ÉTUDES ET RECHERCHES

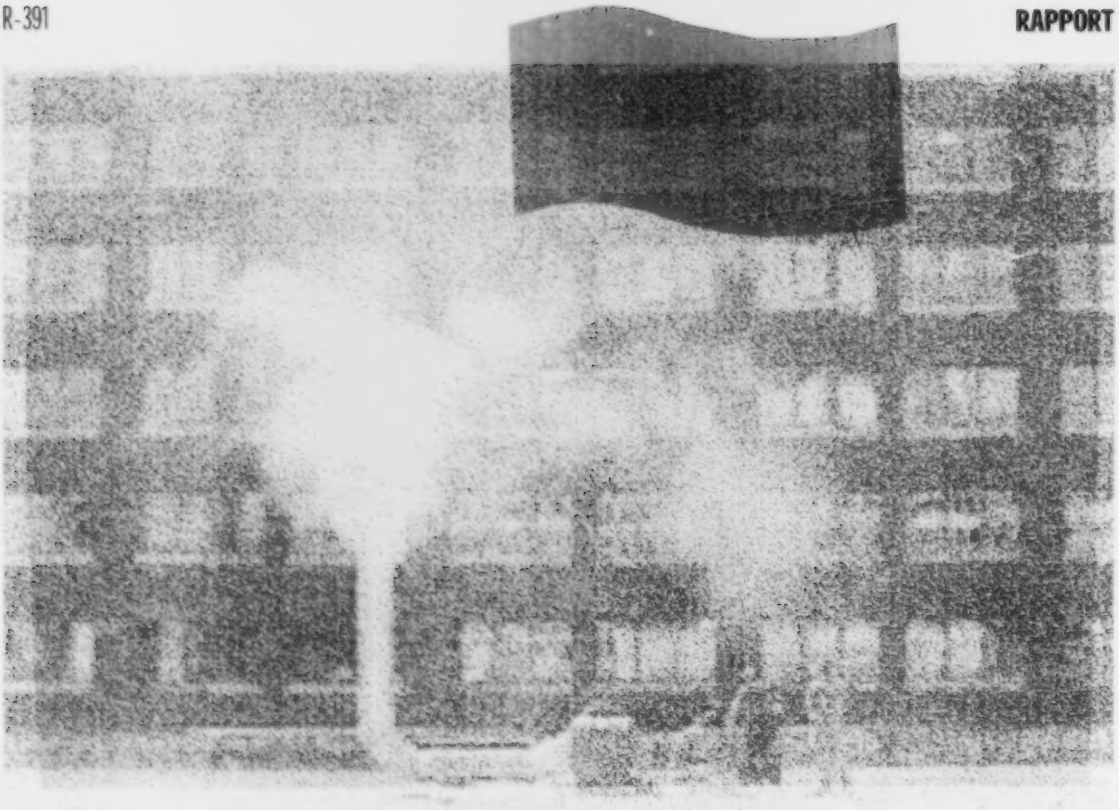
Influence de la hauteur et de l'emplacement des cheminées et des édicules sur la contamination des prises d'air neuf

Étude en laboratoire et *in situ*

Ted Stathopoulos
Louis Lazure
Patrick Saathoff
Amit Gupta

R-391

RAPPORT



irsst

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES
travaillent pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
* Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, décembre 2004

105-06342/

ÉTUDES ET RECHERCHES

Influence de la hauteur et de l'emplacement des cheminées et des édicules sur la contamination des prises d'air neuf

Étude en laboratoire et *in situ*

Ted Stathopoulos[1], Louis Lazure[2],
Patrick Saathoff[1] et Amit Gupta[1]

[1]Université Concordia
[2]Hygiène du travail, IRSST

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

Résumé

La dispersion des émissions d'une cheminée située sur le toit d'un bâtiment de faible élévation en milieu urbain a été étudiée sur le terrain et en soufflerie. Les principaux buts de l'étude étaient les suivants :

1) évaluer l'influence de divers paramètres sur la concentration du panache aux emplacements types de prises d'air neuf ; parmi ces paramètres figurent la hauteur de la cheminée, le facteur d'impulsion, la turbulence, etc. ;
2) évaluer les modèles de dilution récemment adoptés par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE),
3) évaluer le degré de précision de la modélisation en soufflerie ;
4) fournir des lignes directrices visant à réduire le risque de réintroduction des émissions de la cheminée.

Des expériences avec gaz traceur ont été effectuées sur le toit d'un bâtiment de 3 étages du centre-ville de Montréal. L'hexafluorure de soufre (SF_6) a été émis dans l'atmosphère à partir d'une cheminée de 1 m ou de 3 m de hauteur, et les essais ont été effectués à vitesse d'évacuation faible ($w_é \sim 7{,}5$ m/s^{-1}) ou élevée ($w_é \sim 17{,}5$ m/s^{-1}).

Des échantillons d'air ont été recueillis jusqu'à 15 emplacements sur le toit ou sur des murs du bâtiment émetteur. Dans certains cas, des échantillons ont aussi été prélevés au mur sous le vent d'un bâtiment adjacent de 12 étages lorsqu'il se trouvait directement du côté au vent du bâtiment émetteur. Des échantillons ont été prélevés à intervalles de cinq minutes à chacun des emplacements en utilisant un système d'échantillonnage conçu et assemblé par l'IRSST. Dix échantillons ont été recueillis lors de chaque essai, dont la durée totale a donc été de 50 minutes.

Des simulations des essais sur le terrain ont été effectuées dans la soufflerie à couche limite de l'Université Concordia, à une échelle de 1 : 200.

Suit un résumé des directives de conception formulées à partir des résultats obtenus dans le cadre de l'étude :

Emplacement de cheminée : en présence d'un terrain en amont dégagé, il vaut mieux placer la cheminée près du centre du toit. De cette façon, la zone de recirculation du bord au vent du bâtiment est évitée, et l'élévation du panache, maximisée. De plus, la hauteur de panache nécessaire pour éviter tout contact avec les récepteurs au mur sous le vent se trouve minimisée.

En présence d'un bâtiment plus élevé au vent du bâtiment émetteur, le centre du toit peut ne pas constituer l'emplacement optimal de la cheminée en ce qui a trait aux récepteurs du bâtiment émetteur. Les concentrations sur la majeure partie du toit peuvent être réduites en plaçant plutôt la cheminée près du bord au vent du bâtiment. Cependant, ce choix d'emplacement aura pour effet d'accroître les concentrations au mur sous le vent du bâtiment adjacent (en amont).

Hauteur de la cheminée : le fait d'augmenter la hauteur de la cheminée de 1 m à 3 m réduit les concentrations près de la cheminée par un facteur de plus ou moins deux ; loin de la cheminée ($x > 20$ m), l'effet devient négligeable ; une hauteur de cheminée d'au moins 5 m est nécessaire pour obtenir une réduction significative des concentrations à de telles distances.

Vitesse d'évacuation à la sortie de la cheminée : le fait d'augmenter la vitesse d'évacuation de la cheminée par un facteur de 2,5 réduit par le même facteur les concentrations près de la

cheminée. Aux récepteurs éloignés (x > 20 m), l'effet de la vitesse d'évacuation dépend de la valeur de M (le ratio de la vitesse d'évacuation par rapport à la vitesse du vent). Lorsque M est faible (1,5 < M < 4,5), ce qui est couramment le cas lorsque la vitesse du vent dépasse 5 m/s, le fait d'augmenter la vitesse d'évacuation peut ne pas être bénéfique aux récepteurs éloignés étant donné que l'élévation du panache risque de ne pas être suffisante pour les éviter. Par contre, par vents faibles, le fait de doubler la vitesse d'évacuation peut faire en sorte que M soit suffisamment élevé pour que les concentrations se trouvent réduites sur toute la surface du toit.

Comparaison entre les modèles 2003 et 1999 de l'ASHRAE : le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) est moins conservateur que le modèle D_r de l'ASHRAE (2003), et fournit une meilleure estimation dans le cas des échantillonneurs éloignés (S > 30 m).

En **situation de conception type** lorsque M est faible (2,5 < M < 3,5), le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) semble beaucoup trop conservateur, surtout en ce qui a trait aux échantillonneurs éloignés – il sous-estime en effet la dilution par un facteur de 10 dans le cas des récepteurs situés à plus de 30 m de la cheminée. Lorsque M est élevé (M ~ 10), par vent faible par exemple, le modèle D_r sous-estime la dilution des échantillonneurs situés près de la cheminée.

Emplacement des prises d'air neuf : le cas d'un bâtiment émetteur peu élevé dans le sillage d'un bâtiment plus élevé a tout spécialement été étudié. Lorsque le vent vient de la direction du bâtiment plus élevé :

- on ne devrait pas mettre de prises d'air au mur sous le vent du bâtiment au vent ;
- dans la mesure du possible, on devrait mettre les prises d'air au mur sous le vent du bâtiment émetteur.

Outre les directives de conception énoncées ci-dessus, cette étude a permis de dégager les observations qui suivent.

- Les prédictions de concentration issues des essais en soufflerie ne présentaient souvent qu'un écart de 10 % à 20 % par rapport aux valeurs de terrain, et s'en écartaient généralement par un facteur inférieur à 2.

- Certains écarts plus importants entre les données de soufflerie et de terrain ont été constatés lorsque le bâtiment émetteur se trouvait dans le sillage d'un bâtiment plus élevé. Cela pourrait s'expliquer par la faible intensité de la turbulence et (ou) l'absence de turbulence à grande échelle dans la soufflerie relativement à certaines configurations.

    - Les concentrations au mur sous le vent du bâtiment élevé étaient systématiquement trop élevées dans la soufflerie, par un facteur d'environ 3 en moyenne.

- Les concentrations mesurées en soufflerie près de la cheminée du bâtiment émetteur étaient trop faibles, surtout lorsque M était faible.
- Les concentrations mesurées sur le toit du bâtiment émetteur, aussi bien en soufflerie que sur le terrain, étaient comparables dans le cas des échantillonneurs éloignés de la cheminée.

- Dans le cas des configurations avec terrain en amont dégagé, le modèle D_{min} [ASHRAE (1999)] a estimé les dilutions minimales sur le toit de façon plus précise que le modèle D_r [ASHRAE (2003)]. Cela démontre bien la pertinence du modèle de dilution à deux composantes, où la dilution initiale et la dilution en fonction de la distance sont toutes deux prises en compte.

Les résultats obtenus sont encourageants dans la mesure où ils démontrent la capacité générale des données de soufflerie à refléter les situations de conception réelles, tout en soulignant les limites des modèles de l'ASHRAE quant à l'estimation des dilutions réelles pour certaines configurations de bâtiments et certains emplacements de cheminée. Les directives de conception fournies dans ce rapport seront très utiles à l'ingénieur en mécanique du bâtiment au moment d'aborder certains problèmes d'application complexes, à multiples facettes, à l'égard desquels les codes et les normes ne sont d'aucun secours ou ne s'appliquent que trop généralement.

TABLE DES MATIÈRES

SECTION		PAGE
	Résumé	i
	Liste des figures	vi
	Liste des tableaux	x
	Liste des symboles	xi
1.0	Chapitre 1 Introduction	1-1
2.0	Chapitre 2 Revue de la littérature	2-1
3.0	Chapitre 3 Modèles de dispersion de l'ASHRAE	3-1
3.1	La méthode de conception géométrique de l'ASHRAE	3-2
3.2	Modèles de dilution en présence d'un terrain en amont dégagé	3-4
3.2.1	Le modèle de Wilson et Lamb	3-5
3.2.2	Modèle gaussien de dilution (ASHRAE 2003)	3-6
4.0	Chapitre 4 Procédures expérimentales	4-1
4.1	Essais sur le terrain	4-1
4.2	Expériences en soufflerie	4-8
5.0	Chapitre 5 Résultats d'expérience	5-1
5.1	Essais en présence d'un terrain en amont dégagé	5-2
5.1.1	Aperçu des données de terrain (terrain en amont dégagé)	5-3

5.1.2	Effet de M (données de terrain)	5-5
5.1.3	Effet de la hauteur de la cheminée (données de terrain)	5-8
5.1.4	Comparaison des dilutions de terrain aux estimations des modèles de l'ASHRAE	5-9
5.1.5	Comparaison des valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie	5-18
5.1.6	Effet de la hauteur de la cheminée (données de soufflerie)	5-23
5.2	Essais effectués lorsque le Faubourg se trouvait directement au vent du bâtiment BE	5-24
5.2.1	Survol des données de terrain (bâtiment du Faubourg au vent)	5-25
5.2.2	Comparaison des valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie	5-26
6.0	Chapitre 6 Directives de conception	6-1
7.0	Chapitre 7 Conclusions	7-1
	Remerciements	
	Références	
	ANNEXE A	A
	ANNEXE B	B
	ANNEXE C	C

LISTE DES FIGURES

Figure n°	Légende
2.1	Effet de la hauteur de la cheminée sur la concentration normalisée, selon Shulman et Scire (1991).
2.2	Effet de M (facteur d'impulsion) sur la concentration normalisée, selon Shulman et Scire (1991).
2.3	Dilutions normalisées au mur sous le vent d'un bâtiment haut de 2H lorsque le bâtiment émetteur se trouve en aval. Le sillage du bâtiment accuse un écart d'une largeur de 1H, selon Wilson *et al.* (1998).
3.1	Procédure de conception pour faire en sorte que la hauteur de la cheminée soit suffisante pour éviter toute contamination, selon Wilson (1979).
3.2	Système de coordonnées illustrant les distributions gaussiennes dans l'axe horizontal et dans l'axe vertical, selon Turner (1994).
3.3	Zones de recirculation et distances linéaires les plus courtes entre la source d'émission et les prises d'air, selon l'ASHRAE (2003).
4.1	Bâtiment BE, Centre des études sur le bâtiment, Université Concordia, Montréal, vu de l'ouest.
4.2	Vue détaillée du bâtiment BE montrant l'emplacement des cheminées, des anémomètres et des diverses structures de toit (dimensions en m).
4.3	Emplacement du bâtiment BE et des constructions avoisinantes – les bâtiments ombragés ont une hauteur variant entre 30 m et 65 m.
4.4 (a et b)	Photos des abords au vent du bâtiment lors des essais sur le terrain.
4.4 (c et d)	Photos des abords au vent du bâtiment lors des essais sur le terrain.
4.5	Diagramme de la fréquence des vents à Montréal (@ z = 300 m) fondé sur les données de l'aéroport de Dorval.
4.6	Diagramme de la fréquence des vents à Montréal (@ z = 300 m) fondé sur les données de l'observatoire de l'Université McGill.
4.7	Photo montrant les abords construits du bâtiment BE (prise de l'édicule du Faubourg en regardant vers le sud-ouest).

4.8	Photo de la cheminée d'essai installée sur le bâtiment BE (cheminée basse – h_s = 1 m).
4.9	Emplacement des échantillonneurs pour tous les essais sur le terrain et les expériences en soufflerie.
4.10	La soufflerie à couche limite de l'Université Concordia.
4.11 (a et b)	Photo de l'aménagement de la soufflerie.
4.12	Profils verticaux de la vitesse éolienne moyenne et de l'intensité de la turbulence obtenus en milieu urbain dans la soufflerie à couche limite de l'Université Concordia.
5.1	Données éoliennes obtenues à l'emplacement de cheminée 1.
5.2	Données éoliennes obtenues à l'emplacement de cheminée 2.
5.3	Données éoliennes obtenues à l'emplacement de cheminée 4 (essai sur le terrain du 21 nov. 02).
5.4	Variation de la direction éolienne en fonction du temps pour l'essai sur le terrain du 28 juin 01 : emplacement de cheminée 2.
5.5 (a, b, c)	Série chronologique des concentrations k pour les essais sur le terrain du 12 oct. 00 aux échantillonneurs près, à mi-chemin et éloignés de la cheminée : emplacement de cheminée 1.
5.6	Effet du facteur d'impulsion (M) sur k : essai sur le terrain du 12 oct. 00 : emplacement de cheminée 1.
5.7	Effet du facteur d'impulsion (M) sur k : essai sur le terrain du 12 oct. 00 : emplacement de cheminée 1.
5.8	Effet du facteur d'impulsion (M) sur k : essai sur le terrain du 15 mai 02 : emplacement de cheminée 1.
5.9	Variation de la direction éolienne en fonction du temps pour l'essai sur le terrain du 28 juin 01 : emplacement de cheminée 2.
5.10	Variation du facteur d'impulsion (M) en fonction du temps pour l'essai sur le terrain du 30 oct. 01 : emplacement de cheminée 2.
5.11	Effet de la hauteur de la cheminée sur k pour l'essai sur le terrain du 30 oct. 01 : emplacement de cheminée 2.
5.12	Méthode de conception géométrique de l'ASHRAE pour les emplacements de cheminée 1 et 2 : hauteurs de cheminée de 3 m et de 1 m.

5.13	Méthode de conception géométrique de l'ASHRAE pour l'emplacement de cheminée 4 : hauteurs de cheminée de 3 m et de 1 m.
5.14 (a et b)	Comparaison des données de dilution des essais sur le terrain selon le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) et le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) : 12 oct. 00 : essais des heures 1 et 2.
5.15	Comparaison des données de dilution des essais sur le terrain selon le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) et le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) : essai du 15 mai 02.
5.16 (a et b)	Comparaison des données de dilution des essais sur le terrain selon le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) et le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) : 30 oct. 01 : essais des heures 1 et 2.
5.17 (a et b)	Comparaison des données de dilution des essais sur le terrain selon le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) et le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) : 21 nov. 02 : essais des heures 1 et 2.
5.18	Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 30 oct. 01 : essai de l'heure 1.
5.19	Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 30 oct. 01 : essai de l'heure 2.
5.20	Données de soufflerie et de terrain – Diagramme de dispersion et histogramme des concentrations : essai de l'heure 1 du 30 oct. 01 : emplacement de cheminée 2.
5.21	Données de soufflerie et de terrain – Diagramme de dispersion et histogramme des concentrations : essai de l'heure 2 du 30 oct. 01 : emplacement de cheminée 2.
5.22	Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2 : 21 nov. 02 essai de l'heure 1.
5.23	Données de soufflerie et de terrain – Diagramme de dispersion et histogramme des concentrations : essai de l'heure 2 du 21 nov. 02 : emplacement de cheminée 4.
5.24	Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2 : essai du 15 mai 02.
5.25	Données de soufflerie et de terrain – Diagramme de dispersion et histogramme des concentrations : essai du 15 mai 02 : emplacement de cheminée 1.
5.26	Valeurs de k obtenues en soufflerie et sur le terrain : 12 oct. 00 : essai de l'heure 1.
5.27 (a et b)	Diagrammes de dispersion des valeurs de k obtenues en soufflerie et sur le terrain en présence d'un terrain en amont dégagé.
5.28	Histogramme illustrant l'effet de la hauteur de la cheminée sur k : emplacement de cheminée 4, direction éolienne = 150°.
5.29	Vue de face du bâtiment BE et du Faubourg.

5.30	Données éoliennes de terrain obtenues sur le toit du Faubourg (le bâtiment BE étant dans son sillage).
5.31	Test de fumée pour l'essai sur le terrain de l'heure 2 du 06 sept. 02 : emplacement de cheminée 3.
5.32 (a, b, c)	Série chronologique des concentrations k pour les échantillonneurs près, à mi-chemin et éloignés de la cheminée sur le toit du bâtiment BE : essai sur le terrain du 12 août 02 : emplacement de cheminée 3.
5.33 (a, b, c)	Série chronologique des concentrations k pour les échantillonneurs au mur du Faubourg : essai sur le terrain du 26 août 02 : emplacement de cheminée 3.
5.34 (a et b)	Effet de la direction du vent sur k à l'échantillonneur au mur FB2 du Faubourg : emplacement de cheminée 3.
5.35 (a et b)	Effet de la direction du vent sur k à l'échantillonneur au mur P2 du bâtiment BE : emplacement de cheminée 3.
5.36 (a et b)	Comparaison entre les valeurs de k en soufflerie et sur le terrain : essais des heures 1 et 2 du 12 août 02 : emplacement de cheminée 3.
5.37	Variation de k en fonction de la distance sur le toit du bâtiment BE, essai sur le terrain du 12 août 02 : emplacement de cheminée 3.
5.38	Variation de k en fonction de la distance sur le toit du bâtiment BE, essai sur le terrain du 1er oct. 02 : emplacement de cheminée 4.
5.39	Profils verticaux de k au mur sous le vent du Faubourg : essai du 26 août 02, h_s = 3 m : emplacement de cheminée 3.
5.40	Profils verticaux de k au mur sous le vent du Faubourg : essai du 1er oct. 02, h_s = 1 m : emplacement de cheminée 4.
5.41 (a et b)	Histogramme illustrant l'effet de la hauteur de la cheminée sur k pour une direction éolienne de 220° : emplacement de cheminée 3.
5.42 (a et b)	Diagrammes de dispersion des valeurs de k obtenues en soufflerie et sur le terrain lorsque le bâtiment du Faubourg se trouvait au vent.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°	Légende
4.1	Données éoliennes recueillies à l'aide d'un anémomètres sur le bâtiment BE.
4.2	Données éoliennes obtenues à une hauteur de 55 m sur le bâtiment du Faubourg.
4.3	Paramètres d'évacuation pour tous les essais sur le terrain.
5.1	Données éoliennes et paramètres des cheminées pour les essais sélectionnés en présence d'un terrain en amont dégagé.

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition	Unités
A_e	Surface de la cheminée	(m^2)
B_l	Paramètre de dilution en fonction de la distance (modèle D_{min})	(-)
C_{max}	Concentration maximale au récepteur	(-)
C_p	Concentration de polluants dans les émissions	(-)
D	Dilution	(-)
d_e	Diamètre de la cheminée	(m)
D_{crit}	Dilution critique	(-)
D_d	Dilution en fonction de la distance	(-)
D_{min}	Dilution minimale, ASHRAE (1999)	(-)
D_o	Dilution initiale	(-)
D_r	Dilution estimée, ASHRAE (2003)	(-)
EC	Emplacement de la cheminée	(-)
H	Hauteur du bâtiment émetteur	(m)
h	Hauteur effective du panache	(m)
h_c	Hauteur maximale, au-dessus du toit, de la zone de recirculation créée à partir du bord du toit au vent	(m)
h_r	Élévation du panache	(m)
h_s	Hauteur effective de la cheminée	(m)
h_{small}	Hauteur de panache maximale requise pour éviter un récepteur à un emplacement critique	(m)
h_{top}	Hauteur de la zone de recirculation critique	(m)
I.T.	Intensité de la turbulence	(%)

k	Concentration normalisée	(-)
L	Dimension du bâtiment BE dans la direction du vent	(m)
L_c	Longueur de la zone de recirculation au-dessus du toit	(m)
L_r	Longueur de la zone de sillage du bâtiment	(m)
M	Facteur d'impulsion (w_e/U_H)	(-)
Q_e	Débit d'évacuation	(m^3/s)
Q_m	Débit volumique	(m^3/s)
Q_{SF6}	Débit d'injection de l'hexafluorure de soufre	(m^3/s)
R	Longueur d'échelle	(-)
Re_b	Nombre de Reynolds du bâtiment	(-)
Re_c	Nombre de Reynolds de la cheminée	(-)
S	Distance linéaire entre la cheminée et le récepteur	(m)
t_{moy}	Temps de moyennage	(min)
U_H	Vitesse du vent à la hauteur du bâtiment	(m/s)
W_b	Dimension nominale du bâtiment	(m)
w_e	Vitesse d'évacuation	(m/s)
x	Distance à partir du bord du toit au vent du bâtiment BE	(m)
Grec		
δ	Hauteur de la couche limite	(m)
β	Facteur d'obturation de la cheminée	(-)
ν	Viscosité cinématique	(m^2/s)
σ_o	Écart-type de l'étalement initial du panache	(m)
σ_y	Écart-type de l'étalement horizontal du panache	(m)
σ_z	Écart-type de l'étalement vertical du panache	(m)

σ_θ	Écart-type des variations de direction éolienne	(degrés)
θ	Direction du vent	(degrés)
σ_u	Écart-type de la vitesse éolienne dans la direction au vent	(m/s)
α	Exposant de loi de puissance	(0,30)

Chapitre 1

Introduction

Une des principales causes de la mauvaise qualité de l'air intérieur de certains locaux tient à l'introduction sporadique d'air vicié par les prises d'air neuf. Les laboratoires universitaires, hospitaliers et industriels, de même que les usines, sont particulièrement susceptibles d'être touchés par ce phénomène puisqu'ils produisent un large éventail d'émissions chimiques toxiques et nauséabondes. L'effet sur la santé et le bien-être des travailleurs en est d'ailleurs important. Malheureusement, les technologies n'ont pas encore assez évolué pour permettre aux ingénieurs d'appliquer des critères de conception à même d'éliminer ce problème dans les nouvelles constructions, ou même de l'atténuer dans les bâtiments existants. En conséquence, de nombreux incidents liés à la mauvaise qualité de l'air ont été enregistrés et documentés.

La première phase de l'étude, subventionnée par l'IRSST en 1996 [Stathopoulos *et al.* (1999)], a fourni d'importantes données sur la dispersion des panaches provenant de bâtiments implantés en milieu urbain. Des expériences avaient alors été effectuées sur deux bâtiments pour un nombre restreint de directions éoliennes, et des essais analogues avaient parallèlement été effectués en soufflerie. Les résultats obtenus indiquaient que l'utilisation de cheminées d'évacuation à vitesse de sortie élevée ne garantissait pas une dilution adéquate des panaches à tous les points d'un toit, et le facteur d'impulsion, ou M (soit le ratio de la vitesse d'évacuation par rapport à la vitesse du vent), s'est avéré influencer considérablement la dilution d'un gaz traceur émis par une cheminée. Aussi bien les formules de conception actuelles de l'ASHRAE que la modélisation en soufflerie peuvent, en un point donné, sous-estimer la concentration maximale d'un contaminant.

Le présent rapport décrit la deuxième phase de l'étude, qui a débuté en janvier 2000.

Les principaux objectifs en étaient :

1. l'évaluation et l'amélioration des deux outils de modélisation les plus couramment utilisés (c.-à-d. les formules de conception empiriques [comme celles de l'ASHRAE] et la simulation en soufflerie) pour mesurer la concentration des émissions d'une cheminée de toit à divers emplacements ;

et

2. l'élaboration de directives de conception visant à aider les ingénieurs à déterminer l'emplacement, la géométrie et les caractéristiques fonctionnelles appropriées des cheminées de toit dans différents cas en révisant au besoin les modèles actuels.

Cette étude comportait aussi bien des essais sur le terrain que des expériences en soufflerie. Une série d'expériences avec gaz traceur ont été effectuées sur le terrain, soit sur un bâtiment de 3 étages de Montréal, en utilisant un ventilateur portatif comme source d'émission. L'influence des facteurs suivants sur la dispersion du panache à courte distance a été étudiée :

1. l'emplacement de la cheminée par rapport aux zones de décollement de l'écoulement de l'air ;
2. la hauteur de la cheminée ;
3. la valeur de M ;
4. la turbulence atmosphérique (liée à la rugosité du terrain au vent) ;
5. les structures de toit en place ;
6. la présence d'un bâtiment adjacent plus élevé et au vent.

Lors des essais sur le terrain, de l'hexafluorure de soufre (SF_6) était diffusé par un ventilateur à

vitesse variable situé sur le toit de l'immeuble. Les expériences ont été effectuées avec deux vitesses d'évacuation (7,5 m/s et 17,5 m/s) et deux hauteurs de cheminée (1 m et 3 m). Les concentrations de gaz traceur ont été mesurées à 15 points de prélèvement suivant la méthodologie d'échantillonnage de l'air développée dans le cadre de la première phase de l'étude.

Quatre emplacements de cheminée ont été choisis aux fins de l'étude. Les essais sur le terrain effectués relativement aux cheminées qui se trouvaient aux emplacements 1 et 2 ont fourni des données applicables aux cas de forte turbulence en amont des cheminées. Les cheminées 3 et 4 ont quant à elles servi à des essais en présence d'un bâtiment élevé au vent. La cheminée 4 a aussi été utilisée à l'égard d'un cas de terrain en amont dégagé présentant une rugosité caractéristique d'un milieu suburbain.

Une étude paramétrique a enfin été menée en soufflerie afin d'obtenir des données plus détaillées concernant l'incidence de la hauteur d'une cheminée et de M sur la dispersion du panache.

Chapitre 2

Revue de la littérature

Les normes de construction actuelles en ce qui a trait aux systèmes de ventilation stipulent que les cheminées de toit devraient être conçues de manière à ce que leurs émissions ne contaminent pas les prises d'air frais du bâtiment émetteur ou des bâtiments avoisinants. Pour ce faire, on peut devoir augmenter la hauteur de la cheminée (h_s) ou sa vitesse d'évacuation ($w_é$). L'effet de h_s et de $w_é$ sur la distribution des concentrations à la surface des bâtiments a été étudié par le biais de simulations en soufflerie ou dans un canal hydraulique. Dans la plupart de ces études, la dispersion du panache a été évaluée en prenant pour modèle un seul bâtiment isolé.

Schulman et Scire (1991) ont effectué une étude en soufflerie pour évaluer l'incidence de la hauteur de la cheminée et de la vitesse d'évacuation sur la dispersion des émissions d'une cheminée de toit. Leurs expériences ont porté sur un bâtiment isolé de faible élévation dont la cheminée se trouvait au centre du toit. La figure 2.1 illustre l'effet de la hauteur d'une cheminée sur la concentration dimensionnelle normalisée ($C^* = CU_H/Q_m$), où C correspond à la concentration au récepteur, U_H à la vitesse du vent à la hauteur du bâtiment, et Q_m au débit volumique du gaz traceur. Les résultats sont donnés pour une vitesse d'évacuation typique, exprimée sous forme de facteur d'impulsion ($M = w_é/U_H$). Dans ce cas particulier, M = 3, une valeur généralement associée à des vents moyennement forts. Les résultats démontrent que le fait d'augmenter h_s de 0,0 m à 4,6 m réduit C^* par un facteur de 100 près de la cheminée. Cependant, au bord sous le vent du bâtiment, l'augmentation de la hauteur de la cheminée n'offre qu'un

avantage minime, une cheminée de 4,6 m n'ayant pour effet de réduire C* que par un facteur de 4.

La figure 2.2 illustre l'effet de M sur C* lorsque la cheminée est courte (h_s = 1,5 m). Les données démontrent que, près de la cheminée, C* peut être réduit par un facteur de 100 en faisant passer M de 1,5 à 5,0. Près du bord sous le vent du bâtiment, l'effet de M diminue toutefois, C* ne se voyant réduit que par un facteur de 10 lorsqu'on fait passer M de 1,5 à 5,0.

La possibilité de réduire les concentrations de polluants à l'intérieur des immeubles en utilisant des prises d'air neuf dissimulées (au mur) a été évaluée dans le cadre d'une étude en soufflerie réalisée par Petersen et LeCompte (2002). Cette étude a fourni une méthode permettant d'estimer les concentrations aux prises d'air dissimulées à partir des modèles de dispersion conventionnels (ASHRAE, gaussien). Cependant, comme les résultats obtenus provenaient d'une maquette de bâtiment isolé, d'autres essais s'imposent afin de déterminer l'applicabilité de cette méthode en présence de constructions avoisinantes.

Meroney *et al.* (1999) ont évalué les configurations de dispersion et d'écoulement autour de bâtiments de formes variées dans le cadre d'expériences en soufflerie. Les essais de visualisation de l'écoulement ont révélé que les zones de recirculation sont intermittentes, de sorte que la direction de l'écoulement à un point donné sur un toit peut fréquemment passer d'au vent à sous le vent. Les auteurs avancent que l'inexactitude des estimations de dispersion issues de la dynamique des fluides numérique s'explique, du moins en partie, par l'absence d'intermittence dans le modèle numérique.

Wilson *et al.* (1998) ont étudié l'effet de h_s et de $w_é$ sur la dispersion des émissions des bâtiments dans le cadre d'une série d'expériences effectuées dans un canal hydraulique. Leurs essais portaient non seulement sur un bâtiment isolé de faible élévation, mais aussi sur des cas où un bâtiment adjacent se trouvait au vent ou sous le vent par rapport au bâtiment émetteur.

Les résultats obtenus avec un bâtiment au vent plus élevé ont révélé que le mur sous le vent du bâtiment au vent pouvait afficher de faibles valeurs de dilution (concentrations élevées), selon l'emplacement, la hauteur et la vitesse d'évacuation de la cheminée. La figure 2.3 fait état de mesures de dilution minimales au mur sous le vent du bâtiment adjacent en présence des émissions d'une cheminée de 2,1 m située près du bord au vent du bâtiment émetteur. Les valeurs de dilution sont présentées sous forme normalisée ($D_{min} = Q_é/U_H H^2$), où $Q_é$ correspond au débit d'évacuation, et H à la hauteur du bâtiment émetteur.

Les résultats indiquent que, quel que soit M, les valeurs de dilution les plus faibles sont enregistrées près du sommet du mur sous le vent. Ainsi, la dilution augmente considérablement avec l'augmentation de M qui, lorsqu'il passe de 1,5 à 8,0, fait augmenter la dilution normalisée par un facteur d'environ 10. Sur le toit du bâtiment émetteur, la dilution ne variait pas de façon significative à distance de la cheminée. La dilution moyenne sur le toit était plus ou moins égale à la dilution minimale mesurée au mur du bâtiment adjacent.

Cette étude a révélé que les cheminées ne doivent pas être placées près des bords des bâtiments et que les prises d'air frais ne doivent pas se trouver au mur sous le vent d'un bâtiment lorsque les émissions d'un plus petit bâtiment sous le vent sont toxiques ou nauséabondes. De plus, la proximité immédiate d'un plus petit bâtiment au vent du bâtiment émetteur tend à accroître la

dilution sur le toit du bâtiment émetteur, tandis que dans le cas d'un bâtiment au vent plus élevé, une augmentation de la vitesse d'évacuation s'avère plus bénéfique qu'une augmentation de la hauteur de la cheminée.

Des études réalisées par la modélisation des fluides ont démontré l'utilité d'accroître les vitesses de sortie et la hauteur des cheminées pour réduire les concentrations de polluants aux récepteurs qui se trouvent à des emplacements critiques. Cependant, des études sur le terrain ont révélé que, même avec des vitesses d'évacuation élevées et des cheminées moyennement élevées, les concentrations de polluants peuvent atteindre des niveaux inacceptables à certains emplacements. [Wilson et Lamb (1994), Georgakis *et al.* (1995), Saathoff *et al.* (2002)]. Plusieurs facteurs peuvent expliquer le piètre rendement qu'affichent parfois les cheminées de toit. Il peut notamment s'agir de l'emplacement de la cheminée par rapport aux zones de décollement et de recollement, de la présence de structures de toit telles que des édicules, ou encore de forte turbulence en amont.

Il importe de valider les résultats des études fondamentales sur la modélisation des fluides en les comparant à des données en grandeur réelle. Bien que la plupart des caractéristiques d'écoulement (l'ampleur du sillage, l'étendue des zones de recollement, etc.) sous des conditions atmosphériques neutres puissent être fidèlement reproduites en soufflerie ou dans un canal hydraulique, il s'avère nécessaire de déterminer les limites de la modélisation des fluides en ce qui concerne la dispersion des panaches.

Relativement peu d'études ont comparé les données de concentration obtenues en soufflerie aux données de terrain relativement aux cas de diffusion en champ proche (c.-à-d. lorsque les

récepteurs se trouvent à moins de 50 m d'une cheminée). Il s'agit là d'une des applications de modélisation des fluides les plus difficiles à réaliser, étant donné que les caractéristiques du panache peuvent être sensibles à plusieurs facteurs locaux (effet de sillage des bâtiments, position de la cheminée par rapport aux zones de recirculation ou aux formations tourbillonnaires présentes sur le toit, nombre de Reynolds de la cheminée, etc.). Dans le cas des applications en champ éloigné, les caractéristiques du panache sont beaucoup moins sensibles à ces facteurs.

Higson *et al.* (1994) ont effectué des expériences avec gaz traceur sur le terrain, avec une cheminée placée à différentes distances au vent d'un petit bâtiment rotatif, et ils ont comparé les résultats obtenus aux données de soufflerie. Ils ont constaté que les concentrations maximales étaient généralement surestimées dans les essais en soufflerie, alors que les concentrations minimales étaient sous-estimées. On peut en déduire que le panache était plus étroit en soufflerie que sur le terrain du fait de l'absence de fortes turbulences dans la soufflerie.

Plusieurs études réalisées par les auteurs du présent rapport visaient à évaluer la précision des mesures de dispersion obtenues en soufflerie [Stathopoulos *et al.* (2002), Saathoff *et al.* (2002)]. Dans la plupart des cas, les résultats révélaient une concordance appréciable entre les données de soufflerie et les données de terrain. Les valeurs de concentration en soufflerie ne s'écartaient généralement des valeurs de terrain que par un facteur inférieur à deux. La précision des données de soufflerie augmentait en outre le plus souvent en fonction de la distance des récepteurs par rapport à la cheminée.

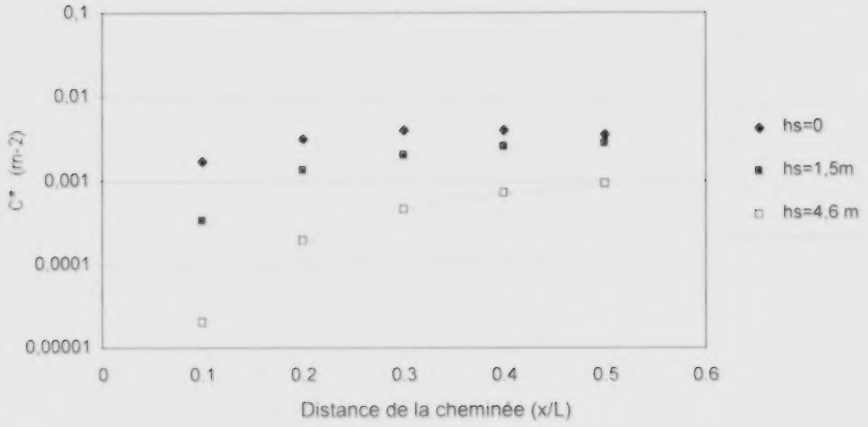


Figure 2.1 Effet de la hauteur de la cheminée sur la concentration normalisée, selon Schulman et Scire (1991)

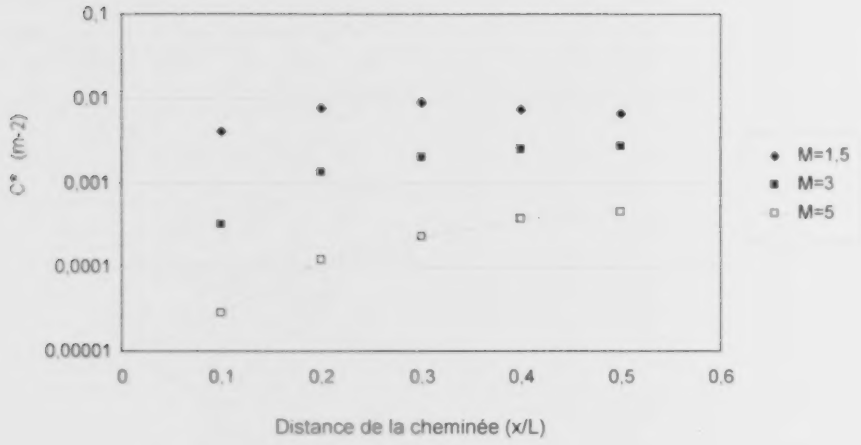


Figure 2.2 Effet de M (facteur d'impulsion) sur la concentration normalisée, selon Schulman et Scire (1991)

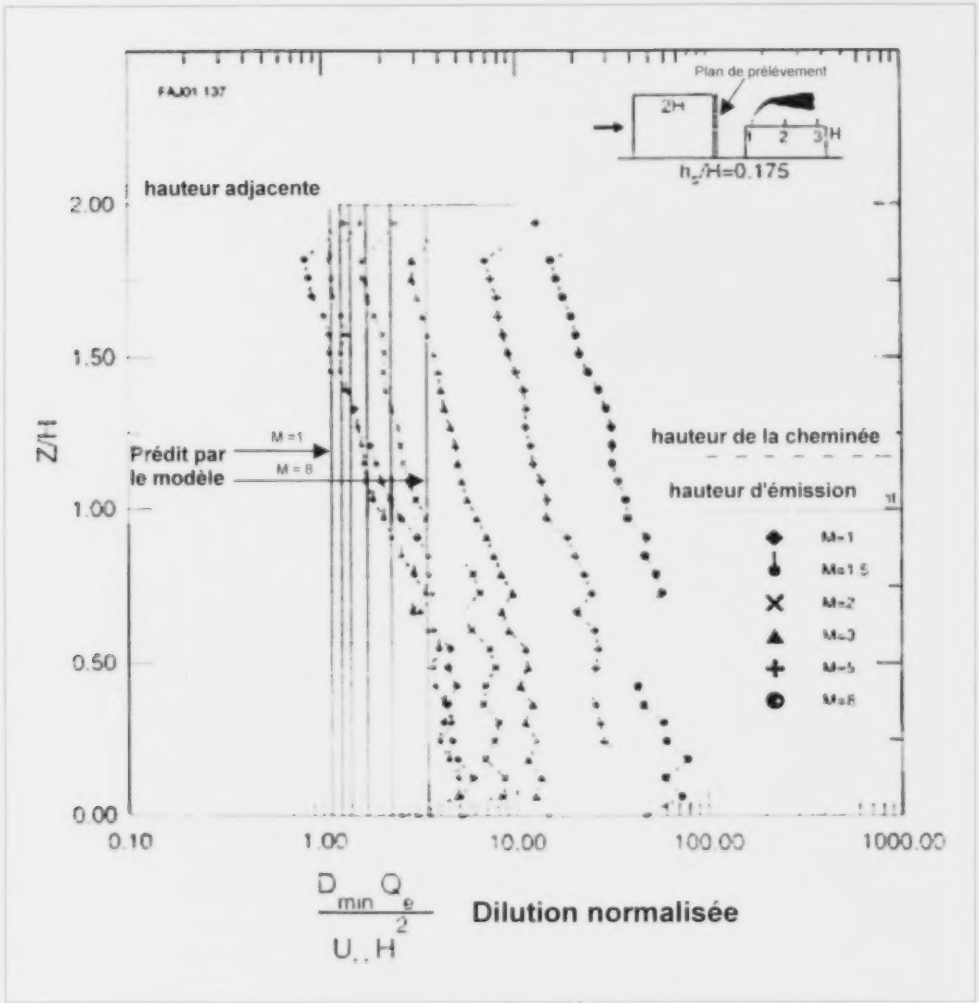


Figure 2.3 Dilutions normalisées au mur sous le vent d'un bâtiment haut de 2H lorsque le bâtiment émetteur se trouve en aval. Le sillage du bâtiment accuse un écart d'une largeur de 1H, selon Wilson *et al.* (1998)

Chapitre 3

Modèles de dispersion de l'ASHRAE

Les expériences de la présente étude peuvent être divisées en deux catégories :

1. la source d'émission est exposée au vent en amont (terrain en amont dégagé) ;
2. la source d'émission se trouve dans le sillage d'un bâtiment élevé.

Divers modèles ont été conçus pour estimer la dilution en champ proche des panaches produits par les cheminées de toit en présence d'un terrain en amont dégagé. Deux de ces modèles, recommandés par l'ASHRAE (1999 et 2003), sont décrits ci-dessous. Le degré de précision de ces modèles sera évalué au chapitre 5 à partir des données de terrain recueillies dans le cadre de la présente étude.

En présence d'un bâtiment élevé situé au vent relativement au bâtiment émetteur, il convient d'obtenir des estimations de dilution pour les récepteurs au mur sous le vent du bâtiment adjacent, de même que sur le toit du bâtiment émetteur. À ce jour, aucun modèle de dilution acceptable n'a encore été conçu pour ce cas précis [p. ex., voir Wilson *et al.* (1998)].

Outre des modèles de dilution qui fournissent des estimations quantitatives quant à la dispersion des panaches, l'ASHRAE (2003) propose une méthode géométrique visant à prédire la probabilité qu'un panache entre en contact avec un récepteur de toit critique. Cette méthode, de nature

qualitative, est décrite ci-dessous.

3.1 La méthode de conception géométrique de l'ASHRAE

L'ASHRAE (2003) propose une méthode de conception géométrique des cheminées afin d'estimer la hauteur minimale que doit avoir une cheminée pour éviter que le panache ne soit entraîné vers les zones de recirculation d'un bâtiment et des éléments situés sur le toit. La taille des zones de recirculation est exprimée en longueur d'échelle (R), définie comme suit :

$$R = B_S^{0,67} B_L^{0,33} \qquad (3\text{-}1)$$

où B_S correspond à la plus petite valeur entre la hauteur et la largeur du bâtiment au vent, et B_L à la plus grande de ces valeurs. La taille des zones de recirculation qui se forment au-dessus du bâtiment et de ses structures de toit s'exprime dès lors comme suit :

$$H_r = 0,22R \qquad (3\text{-}2)$$

$$X_c = 0,5R \qquad (3\text{-}3)$$

$$L_c = 0,9R \qquad (3\text{-}4)$$

$$L_r = 1,0R \qquad (3\text{-}5)$$

où H_r correspond à la hauteur maximale de la zone de recirculation au-dessus du toit, X_c à la distance entre le bord antérieur du toit et H_r, L_c à la longueur de la zone de recirculation au-dessus du toit, et L_r à la longueur de la zone de sillage du bâtiment. Notez que la hauteur de la zone de sillage est égale à la hauteur de la structure.

La figure 3.1 montre les zones de recirculation d'un bâtiment type.

Cette méthode de conception suppose que la limite de la zone de forte turbulence est définie par une droite ayant une pente de 10:1 qui part du sommet de la bulle de décollement du bord antérieur. La position du panache par rapport aux zones de recirculation est déterminée en fonction de l'élévation du panache sous l'effet du facteur d'impulsion, suivant l'hypothèse qu'il s'agit d'un panache conique ayant une pente de 5:1.

La hauteur réelle du panache au-dessus du toit ou des éléments qui s'y trouvent est exprimée comme suit :

$$h = h_s + h_r - h_d \qquad (3\text{-}6)$$

où h_s correspond à la hauteur de la cheminée, h_r à l'élévation du panache, et h_d à la réduction de la hauteur du panache sous l'effet d'entraînement du sillage de la cheminée par grands vents. Il convient de noter que h_s correspond à la hauteur de l'extrémité de la cheminée au-dessus du toit moins la hauteur des obstacles qui se trouvent sur le toit (inclusion faite de leurs zones de recirculation) dans la trajectoire du panache.

L'élévation du panache, qu'on présume survenir instantanément, est calculée en utilisant la formule de Briggs (1984) :

$$h_r = 3\beta d_e (w_e/U_H) \qquad (3\text{-}7)$$

où d_e correspond au diamètre de la cheminée, w_e à la vitesse d'évacuation, U_H à la vitesse du vent à la hauteur du bâtiment, et β au facteur d'obturation de la cheminée. La valeur de β est de 1 pour

les cheminées sans capuchon et de 0 pour les cheminées avec capuchon. Pour tenir compte du rabattement du panache causé par une faible vitesse d'évacuation de la cheminée, soit lorsque $w_e/U_H < 3,0$, Wilson *et al.* (1998) ont recommandé un ajustement (h_d) au rabattement du panache dans le sillage de la cheminée, tel que :

$$h_d = d_c\,(3,0 - \beta w_e/U_H) \qquad (3\text{-}8)$$

Pour $w_e/U_H > 3,0$, la présence de la cheminée ne provoque aucun rabattement du panache ($h_d = 0$).

3.2 Modèles de dilution en présence d'un terrain en amont dégagé

Plusieurs modèles semi-empiriques ont été élaborés afin de prédire la dilution minimale ($D_{min} = C_e/C_{max}$) des émissions des cheminées de toit, C_e correspondant à la concentration des émissions et C_{max} à la concentration maximale à un récepteur au toit ou au mur sur la ligne médiane du panache. Le manuel ASHRAE Applications, Handbook [ASHRAE (2003)] recommande un modèle gaussien de dilution élaboré à partir des données d'expériences effectuées dans un canal hydraulique par Wilson *et al.* (1998). Dans une version antérieure du manuel [ASHRAE (1999)], on recommandait plutôt les modèles de dilution minimale formulés par Wilson et Lamb (1994) et Halitsky (1963). De ces derniers, le modèle de Wilson et Lamb fournit une limite de dilution inférieure plus exacte, fondée sur des études en soufflerie et sur le terrain [Petersen et Wilson (1989), Stathopoulos *et al.* (2002)]. Le modèle de Halitsky s'est quant à lui avéré trop conservateur dans la plupart des cas.

Dans la présente étude, l'exactitude des modèles de dilution de Wilson et Lamb et de

l'ASHRAE (2003) sera évaluée à partir de données recueillies lors d'essais en grandeur réelle effectués en présence d'un terrain en amont dégagé.

3.2.1 Le modèle de Wilson et Lamb

Le modèle de Wilson et Lamb, ci-après désigné sous le nom de WL, repose sur un modèle de dilution antérieur relatif aux cheminées d'évacuation en effleurement d'un toit ($h_s = 0$), et dérivé de données d'essais en soufflerie avec des maquettes de bâtiments isolés [Wilson et Chui (1985, 1987), Chui et Wilson (1988)]. Dans ce modèle, la dilution minimale le long de la ligne médiane du panache s'obtient comme suit :

$$D_{min} = (D_o^{0.5} + D_d^{0.5})^2 \qquad (3\text{-}9)$$

où D_o correspond à la dilution initiale à l'emplacement de la source d'émission, et D_d à la dilution en fonction de la distance sous l'effet de la turbulence atmosphérique et de la turbulence créée par les bâtiments avoisinants. Les formules pour D_o et D_d recommandées par l'ASHRAE (1999) sont les suivantes :

$$D_o = 1 + 13BM \qquad (3\text{-}10)$$

$$D_d = B_1 S^2 / MA_e \qquad (3\text{-}11)$$

où B_1 correspond au paramètre de dilution en fonction de la distance, S à la distance linéaire la plus courte entre la cheminée et le récepteur, et M le ratio de la vitesse d'évacuation (w_e) par rapport à la vitesse du vent à la hauteur du bâtiment (U_H). Le paramètre β représente le facteur d'obturation de la cheminée, et est fixé à 1,0 pour les cheminées sans capuchon. Le paramètre B_1 se voit attribuer une valeur constante dont la grandeur dépend de l'emplacement des récepteurs.

Les données de dilution obtenues lors d'une étude sur le terrain [Wilson et Lamb (1994)] et lors d'une étude en soufflerie [Wilson et Chui (1987)] indiquent que B_1 est fortement influencé par le niveau de turbulence atmosphérique du vent en amont. L'effet de la turbulence en amont sur le paramètre de dilution en fonction de la distance est estimé par la formule suivante :

$$B_1 = 0{,}027 + 0{,}0021\sigma_\theta \qquad (3\text{-}12)$$

où σ_θ correspond à l'écart-type des variations de direction éolienne en degrés, et varie entre 0° et 30°. Le modèle suggère que la dilution en fonction de la distance comporte deux éléments – la dilution due à la turbulence créée par les bâtiments avoisinants et la dilution due à la turbulence atmosphérique. Il suppose que D_d est considérablement rehaussé par la turbulence atmosphérique. En milieu urbain, l'ASHRAE (1997) recommande une valeur type de $\sigma_\theta = 15°$, ce qui donne une valeur de 0,032 pour l'élément atmosphérique du paramètre de dilution en fonction de la distance ($B_1 = 0{,}059$). On présume ainsi que plus de 50 % de D_d est dû à la turbulence en amont.

3.2.2 Modèle gaussien de dilution (ASHRAE 2003)

Le modèle gaussien de dilution recommandé par l'ASHRAE (2003) repose sur une série d'expériences effectuées dans un canal hydraulique par Wilson *et al.* (1998). Ce modèle prédit la pire éventualité de dilution au niveau du toit (D_r) en supposant que le panache ait un profil de concentration gaussien (en forme de cloche) dans l'axe aussi bien vertical qu'horizontal, tel qu'illustré à la figure 3.2. Il convient de noter que D_r correspond à la dilution prévue sur la ligne médiane du panache, et qu'il correspond par conséquent à la D_{min} obtenue avec le modèle de WL.

La dilution au niveau du toit avec un panache d'une hauteur h et un récepteur situé à une distance X de la cheminée s'obtient comme suit :

$$D_r = 4\frac{U_H}{w_e}\frac{\sigma_y}{d_c}\frac{\sigma_z}{d_c}\exp\left[\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right] \qquad (3\text{-}13)$$

où U_H correspond à la vitesse du vent à la hauteur du bâtiment, d_c au diamètre de la cheminée, w_e à la vitesse d'évacuation, et σ_y et σ_z à l'étalement horizontal et vertical du panache, respectivement. La hauteur du panache h au-dessus du toit ou de ses structures est déterminée en utilisant l'équation 3-6.

Les équations pour σ_y et σ_z sont celles du modèle de dispersion de l'ISCST, élaboré par l'USEPA [EPA (1995)], dont le temps de moyennage de 60 minutes a été réduit à 2 minutes en utilisant la loi de puissance de 0,2 appliquée aux étalements vertical et transversal. Les formules d'étalement du panache sont fondées sur les données de canal hydraulique de Wilson *et al.* (1998), qu'on présume avoir un temps de moyennage en grandeur réelle équivalent de 2 minutes.

Les valeurs d'étalement vertical et transversal sont fournies par les équations suivantes :

$$\frac{\sigma_y}{d_c} = 0{,}071\left(\frac{t_{moy}}{2{,}0}\right)^{0{,}2}\frac{X}{d_c} + \frac{\sigma_o}{d_c} \qquad (3\text{-}14)$$

$$\frac{\sigma_z}{d_c} = 0{,}071\frac{X}{d_c} + \frac{\sigma_o}{d_c} \qquad (3\text{-}15)$$

où t_{moy} correspond au temps de moyennage (en minutes) de la concentration, et σ_o à la taille initiale de la source d'émission, compte tenu du diamètre de la cheminée et de la dilution due à l'entraînement du jet lors de l'élévation du panache. La formule pour σ_o/d_c est :

$$\frac{\sigma_o}{d_c} = \left[0{,}125\beta\frac{w_c}{U_H} + 0{,}911\beta\left(\frac{w_c}{U_H}\right)^2 + 0{,}250\right]^{.5} \qquad (3\text{-}16)$$

où β correspond au facteur d'obturation, aussi décrit précédemment : $\beta = 1$ pour une cheminée sans capuchon, et $\beta = 0$ pour une cheminée avec capuchon.

Le modèle gaussien de dilution [équation 3-13) ne devrait pas être utilisé lorsque la hauteur du panache (h) est inférieure à la hauteur maximale des zones de recirculation créées à partir du toit dans la trajectoire du panache. Cette hauteur critique est désignée h_{top} et illustrée à la figure 3.3. Dans les cas où la hauteur du panache est supérieure à h_{top} mais inférieure à la hauteur requise pour échapper à toutes les zones critiques de recirculation (h_{valid} à la figure 3.3), la hauteur physique de la cheminée devrait être fixée à 0 au moment de calculer la valeur de h [ASHRAE (2003)].

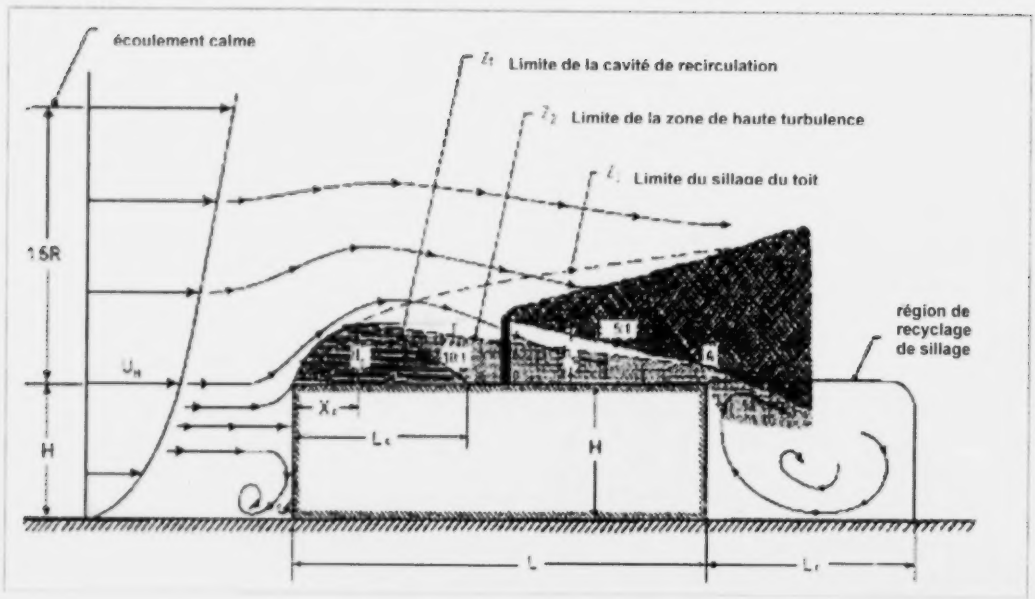


Figure 3.1 Procédure de conception pour faire en sorte que la hauteur de la cheminée soit suffisante pour éviter toute contamination, selon Wilson (1979)

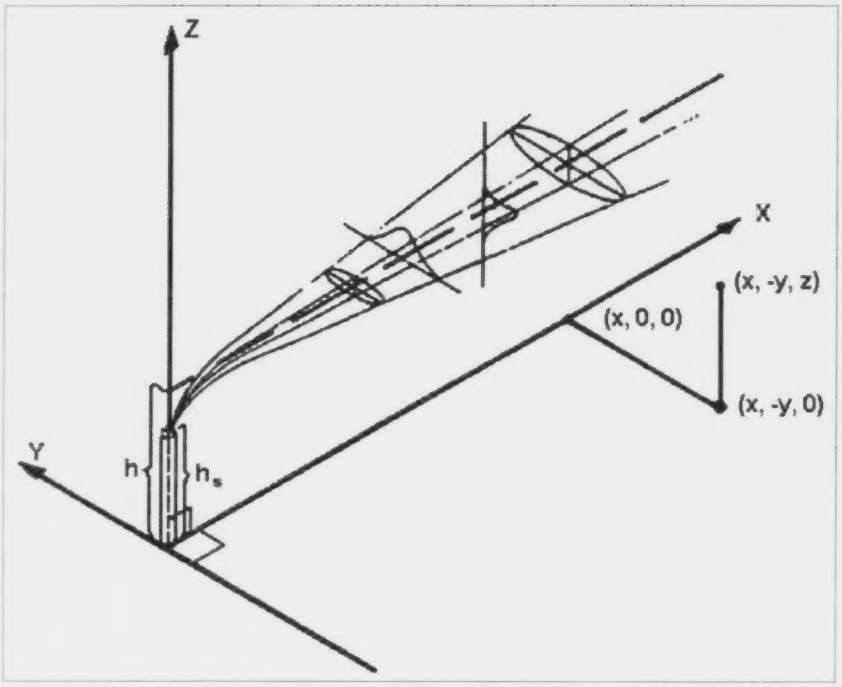


Figure 3.2 Système de coordonnées illustrant les distributions gaussiennes dans l'axe horizontal et dans l'axe vertical, selon Turner (1994)

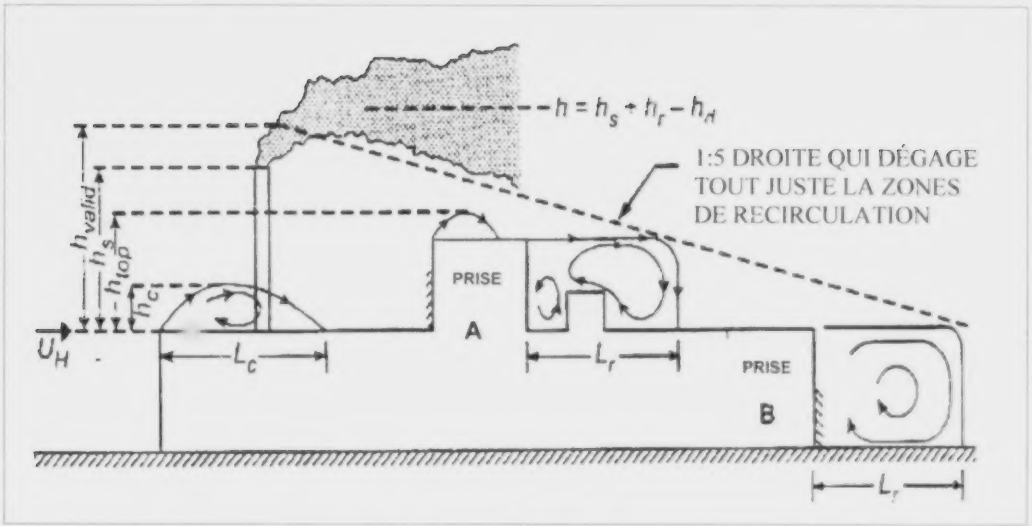


Figure 3.3 Zones de recirculation et distances linéaires les plus courtes entre la source d'émission et les prises d'air, selon l'ASHRAE (2003)

Chapitre 4

Procédures expérimentales

4.1 Essais sur le terrain

Des expériences avec gaz traceur ont été effectuées en grandeur réelle sur le toit d'un bâtiment de 3 étages du centre-ville de Montréal. Le bâtiment BE, illustré à la figure 4.1, abrite le Département de génie du bâtiment et des génies civil et de l'environnement de l'Université Concordia, de même que divers commerces. Des rangées de bâtiments de hauteur comparable jouxtent le bâtiment BE de part et d'autre en directions nord-est et sud-est.

La figure 4.2 présente un dessin détaillé du toit du bâtiment BE. La hauteur du toit principal est de 12,5 m. Plusieurs petites structures se trouvent sur le toit, leur hauteur variant entre 2,2 m et 4,0 m. Quatre emplacements de cheminée (EC1-EC4) ont été retenus aux fins de l'étude, tel qu'illustré à la figure 4.2.

La figure 4.3 présente une carte des environs montrant les emplacements des bâtiments élevés. La structure la plus importante des environs est celle du Faubourg, un bâtiment de 12 étages faisant 50 m de hauteur qui se trouve de l'autre côté de la rue du côté sud-ouest. Plusieurs tours d'habitation se trouvent à l'ouest et au nord-ouest du bâtiment BE à des distances variant entre 100 m et 300 m. Le mont Royal, une colline haute de 233 m dont le sommet se trouve à environ 1 km au nord-ouest du bâtiment BE, ne figure pas sur la carte. La figure 4.4 présente des photos des environs pour les directions éoliennes à l'essai (ouest, nord-ouest, sud-ouest et sud-est).

Les conditions éoliennes dans le voisinage du bâtiment BE sont comparables à celles de l'aéroport de Dorval, situé à 20 km à l'ouest de Montréal. La rose des vents de l'aéroport de Dorval présentée à la figure 4.5 révèle que les vents dominants sont d'ouest-sud-ouest et du nord-est. Au centre-ville, la fréquence et la force des vents d'ouest sont réduites par l'effet de paravent du mont Royal. La rose des vents présentée à la figure 4.6, qui montre clairement l'influence du mont Royal, provient des données obtenues sur un bâtiment de 14 étages du campus de l'Université McGill, situé à environ 1 km au nord-est du bâtiment BE.

La plupart des essais sur le terrain ont été effectuées par vents moyennement forts (U_{Dorval} > 4 m/s^{-1}). Les vitesses éoliennes de cet ordre correspondent généralement à une atmosphère neutre ou légèrement instable [Turner (1994)], et se prêtent donc à la modélisation en soufflerie. La décision de procéder à un essai un jour donné reposait sur les prévisions éoliennes d'Environnement Canada (Dorval) et sur la disponibilité du personnel de l'IRSST et de l'Université Concordia.

Pour la plupart des essais avec terrain en amont dégagé, les données éoliennes ont été recueillies sur le bâtiment BE à l'aide d'un anémomètre sonique Gill à 3 composantes, installé à une hauteur de 4 m au-dessus du puits de lumière, tel qu'illustré à la figure 4.2. L'anémomètre mesurait la vitesse moyenne du vent (U_H), la direction éolienne (θ) et les écarts-types de 3 composantes de la vélocité (σ_x, σ_y et σ_z) à intervalles de 1 minute. Les indices x et y correspondent aux axes horizontaux de l'anémomètre, plutôt qu'au sens de l'écoulement. Les valeurs σ_x et σ_y ont été utilisées pour calculer celles de σ_u et σ_v, soit les écarts-types des fluctuations de vitesse longitudinales et latérales. La méthode utilisée pour établir la valeur de σ_u et σ_v est décrite à l'annexe A de Stathopoulos *et al.* (1999).

Notez que les données relatives aux vitesses éoliennes n'ont pas été corrigées pour la différence de hauteur entre le toit principal (élév. 12,5 m) et l'anémomètre (élév. 19 m).

Dans un essai effectué lorsque le terrain en amont était dégagé (21 nov. 2002, EC4), l'anémomètre sonique n'était pas fonctionnel. Pour cet essai, un anémomètre à 3 coupelles monté sur un mât de 3 m a été installé sur la structure de toit haute de 4 m qui se trouve près de l'angle sud du bâtiment, tel qu'illustré à la figure 4.2. Les données éoliennes de tous les essais effectués lorsque le terrain en amont était dégagé sont présentées au tableau 4.1, à l'exception de celles de la dernière journée d'essai (21 nov. 2002), pour laquelle les données relatives à l'intensité de la turbulence et à la direction du vent ne sont pas disponibles en raison d'une défaillance de l'anémomètre.

En ce qui a trait aux essais effectués lorsque l'édifice Faubourg se trouvait directement au vent du bâtiment BE, les données éoliennes obtenues sur le bâtiment BE sont invalidées par des effets de sillage. Lors de ces essais, les données éoliennes ont été recueillies à l'aide d'un anémomètre à hélice Young monté sur un mât de 5 m installé sur l'édicule du Faubourg. Cet anémomètre a servi à mesurer la vitesse moyenne du vent ($U_{réf}$), la direction éolienne moyenne (θ) et l'écart-type de la vitesse et de la direction du vent (σ_u, σ_θ) à intervalles de 5 minutes. La vitesse du vent à la hauteur du bâtiment BE a été dérivée de $U_{réf}$, en utilisant un exposant de loi de puissance α = 0,30. Cette valeur de α est appropriée pour l'environnement construit présenté à la figure 4.7. Les données éoliennes obtenues avec l'anémomètre du Faubourg sont présentées au tableau 4.2.

L'hexafluorure de soufre (SF_6) a été utilisé comme gaz traceur lors des essais sur le terrain. On a injecté du SF_6 pur dans la bouche d'entrée du ventilateur à vitesse variable illustré à la figure 4.8 ; la concentration à la bouche de sortie a été mesurée à intervalles de 1 minute à l'aide d'un

analyseur multi-gaz Bruel & Kjaer. Le diamètre (d_c) de la sortie de la cheminée était de 0,4 m et sa hauteur (h_c) pouvait faire passer de 1 m à 3 m. Des aubes directionnelles ont été installées dans le coude du conduit d'évacuation afin d'assurer un écoulement uniforme à la sortie. Les essais ont été effectués à faible débit d'évacuation ($Q \sim 1{,}0\ m^3/s^{-1}$) et à débit d'évacuation élevé ($Q \sim 2{,}3\ m^3/s^{-1}$). Le tableau 4.3 présente les paramètres d'évacuation pour chacun des essais. Les débits volumétriques ont été calculés à partir des mesures de vitesse d'écoulement transversal relevées avec un anémomètre TSI (modèle 8384).

Des échantillons d'air ont été recueillis dans des sacs Cali-5-Bond de 1 litre (Calibrated Instruments Inc.) au moyen de 15 échantillonneurs automatiques conçus et construits par l'IRSST. Lors de chaque essai de 50 minutes, dix échantillons de 5 minutes ont été recueillis. Afin d'évaluer l'effet de la hauteur de la cheminée ou de la vitesse d'évacuation dans des conditions atmosphériques semblables, on procédait généralement à deux essais par jour. Dans le cadre de certains essais, des échantillons au mur ont été recueillis à deux ou trois emplacements du Faubourg ou du bâtiment BE. Les échantillonneurs au mur étaient placés près du bord du toit, et les tubes de prélèvement allongés à 3 m. Cela nous a permis d'obtenir des échantillons le long du mur à environ 2,5 m sous le bord du toit. Des échantillons au mur ont aussi été recueillis à différentes hauteurs du Faubourg à l'aide d'une pompe reliée à des tubes en plastique et fonctionnant de façon continue. Une pompe à seringue était reliée aux tubes de manière à obtenir des échantillons aux 5 minutes correspondant aux échantillons en sac recueillis aux autres emplacements.

Les emplacements des échantillonneurs de toit utilisés pour tous les essais sur le terrain et pour l'étude en soufflerie sont indiqués à la figure 4.9. L'emplacement des échantillonneurs au mur placés du côté nord-est du Faubourg et du côté nord-ouest du bâtiment BE sont aussi indiqués.

Tableau 4.1 Données éoliennes recueillies à l'aide d'un anémomètre sur le bâtiment BE

Date de l'essai	**Heure**	**$U_{réf}$ (m/s^{-1})**	**Intensité de la turbulence $\sigma_u/U_{réf}$**	**Direction éolienne moyenne θ °**
12 oct. 00	1	3,3	0,48	240
	2	3,0	0,47	242
15 nov. 00	1	2,8	0,48	248
	2	2,4	0,47	252
28 juin 01	1	1,5	0,44	321
	2	1,6	0,45	310
29 août 01	1	1,9	0,40	310
	2	1,8	0,43	312
30 oct. 01	1	2,3	0,45	305
	2	2,1	0,45	316
15 mai 02	1	3,0	0,48	267
21 nov. 02	1	1,5	**	160*
	2	1,7	**	160*

** manquant

* mesuré à l'aéroport de Dorval

Tableau 4.2 Données éoliennes obtenues à une hauteur de 55 m sur le bâtiment du Faubourg

Date de l'essai	**Heure**	**$U_{réf}$ (m/s^{-1})**	**Intensité de la turbulence $\sigma_u/U_{réf}$**	**Direction éolienne moyenne θ °**	σ_θ°	**U_H * (m/s^{-1})**
12 août 02	1	5,7	0,25	223	13,1	3,7
	2	5,9	0,29	220	15,2	3,8
26 août 02	1	7,2	0,30	219	16,8	4,6
	2	7,0	0,27	224	14,6	4,5
6 sept. 02	1	4,1	0,36	213	20,4	2,6
	2	4,7	0,28	227	13,9	3,0
1er oct. 02	1	5,7	0,32	222	15,5	3,6
	2	6,8	0,31	227	18,3	4,4

* Estimation de U_H par l'application d'une loi de puissance où $\alpha = 0,3$

Tableau 4.3 Paramètres d'évacuation pour tous les essais sur le terrain.

Date de l'essai	Heure	Débit (m^3/s^{-1})	Vitesse d'évacuation $w_é$ (m/s^{-1})	Facteur d'impulsion (M)	Hauteur de la cheminée h_s (m)
12 oct. 00	1	2,29	17,7	5,4	1
	2	0,95	7,4	2,5	1
15 nov. 00	1	2,29	17,7	6,3	1
	2	2,29	17,7	7,5	3
28 juin 01	1	2,44	18,8	12,9	1
	2	1,05	8,1	5,1	1
29 août 01	1	2,30	17,8	9,4	3
	2	0,98	7,6	4,4	3
30 oct. 01	1	0,98	7,6	3,4	1
	2	0,98	7,6	3,6	3
15 mai 02	1	0,98	7,6	2,5	3
12 août 02	1	2,33	18,0	4,9	1
	2	1,14	8,8	2,3	1
26 août 02	1	0,99	7,7	1,7	3
	2	2,29	17,7	3,9	3
6 sept. 02	1	0,98	7,6	2,9	1
	2	0,98	7,6	2,5	3
1er oct. 02	1	0,94	7,3	2,0	1
	2	2,12	16,4	3,7	1
21 nov. 02	1	0,99	7,7	5,6	1
	2	2,30	17,8	10,7	1

Au terme des essais, la moitié des sacs d'échantillon (environ 150) ont été transportés au laboratoire de l'IRSST pour y être analysés. Le contenu des autres sacs a été analysé à l'Université Concordia. À l'IRSST, l'analyse a été effectuée à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse de marque LAT (modèle Autotrac) offrant une précision de ±4,5 % sur l'échelle dynamique. À l'Université Concordia, l'analyse a été effectuée à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse de marque Varian équipé d'un détecteur à capture d'électrons. La précision de cet instrument est comparable à celle du chromatographe LAT. Des échantillons choisis ont été analysés au moyen des deux appareils, et les mesures obtenues dans un cas comme dans l'autre étaient généralement cohérentes, leur variabilité étant le plus souvent inférieure à 10 %.

4.2 Expériences en soufflerie

Les expériences en soufflerie ont été effectuées dans la soufflerie à couche limite de l'Université Concordia. La soufflerie est une installation à circuit ouvert, tel qu'illustré à la figure 4.10. La chambre d'essai fait 1,8 m sur 1,8 m, sur une longueur de 12,2 m. Le toit de la soufflerie a été ajusté de manière à ce que le gradient de pression statique longitudinal reste négligeable.

Des maquettes détaillées du bâtiment BE et du Faubourg, ainsi que de leurs environs, ont été fabriquées à l'échelle 1:200. Du côté au vent, les environs ont été reproduits sur une distance d'au moins 250 m; du côté sous le vent, les bâtiments avoisinants ont été inclus jusqu'à une distance de 50 m. Des photos de la maquette sont fournies à la figure 4.11. L'influence du mont Royal sur les résultats n'a pas été simulée en raison des difficultés liées à la reproduction du profil de la colline pour différentes directions éoliennes. L'effet de la colline pourrait être significatif par vents d'ouest et du nord-ouest. Cependant, on présume que les bâtiments élevés qui se trouvent près du

bâtiment BE ont une influence beaucoup plus importante que la colline sur le comportement du panache.

Tout blocage de la soufflerie peut affecter le champ d'écoulement autour des maquettes, et ainsi fausser les mesures de concentration. L'ASCE (1999) recommande dès lors de corriger les mesures lorsque le ratio de blocage (A_m/A_o) est supérieur à 5 %, A_m correspondant à la surface projetée de la maquette dans le sens normal de l'écoulement et A_o, à la surface transversale de la soufflerie. Dans la présente étude, le blocage était relativement faible ; cela dit, le ratio de blocage maximal estimé était d'environ 7 %, et aucune correction liée au blocage n'a été appliquée aux mesures obtenues en soufflerie.

Un mélange certifié d'hexafluorure de soufre et d'azote a été injecté dans une cheminée de laiton de 2 mm de diamètre. Son écoulement à la sortie de la cheminée a été régularisé à l'aide d'un régulateur de débit massique Matheson. Des échantillons d'air d'une durée de 1 minute ont été recueillis jusqu'à 20 emplacements, et ce, de façon simultanée, en ayant recours à des échantillonneurs multi-seringue. Ces échantillons d'air ont ensuite été analysés à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse Varian.

Les données de vitesse éolienne et de turbulence ont été recueillies à l'aide d'un thermo-anémomètre TSI. Les profils de vitesse éolienne moyenne et d'intensité de turbulence en amont (sans la maquette) sont reproduits à la figure 4.12. Le profil de vitesse moyenne obtenu dans le cadre de la présente étude a un exposant de loi de puissance de $\alpha = 0{,}30$, représentatif d'un milieu urbain. Cela dit, les intensités de turbulence à chaque hauteur étaient moindres que celles définies par l'ESDU (1985) en milieu urbain.

L'échelle longitudinale intégrale (L_x) a été obtenue en ajustant le spectre de turbulence, mesuré à une hauteur en grandeur réelle de 10 m, au spectre de Von Karman. La valeur modélisée de L_x était de 0,4 m, ce qui correspond à une valeur en grandeur réelle de 80 m.

La longueur de rugosité du modèle (z_o) était de 2,8 mm. À l'échelle 1:200, la longueur de rugosité équivalente en grandeur réelle est de 0,66 m, soit à l'extrémité inférieure de la fourchette prévue en milieu urbain ($0,5 \text{ m} < z_o < 1,5 \text{ m}$) [Wieringa (1993)].

Un paramètre important de la modélisation de la dispersion des émissions d'une cheminée est le facteur d'impulsion ($M = w_e/U_H$), où w_e correspond à la vitesse d'évacuation et U_H à la vitesse du vent à la hauteur du bâtiment BE. La vitesse éolienne de référence ($U_{réf}$) a été mesurée à une hauteur en grandeur réelle ($H_{réf}$) de 55 m à l'emplacement de l'anémomètre de terrain. La valeur de U_H a été estimée en appliquant la loi de puissance suivante :

$$U_H = U_{réf}(H/H_{réf})^{\alpha}$$

En supposant que $\alpha = 0,30$, le facteur de correction pour obtenir U_H est de $(12,5/55,0)^{0,3} = 0,64$.

Les critères suivants sont généralement considérés comme suffisants pour modéliser la dispersion d'émissions non flottantes dans une atmosphère neutre :

- similitude de la couche limite de la soufflerie et de la couche limite de surface ;
- dimensions géométriques similaires ;
- nombres de Reynolds des bâtiments ($Re_b = U_H W_b/\nu > 11\,000$) ;
- nombres de Reynolds des cheminées ($Re_c = w_e d_e/\nu > 2\,000$) ;
- facteur d'impulsion similaire des cheminées ($M = w_e/U_H$) ;

où v correspond à la viscosité cinématique de l'air, W_b à la dimension nominale du bâtiment et d_c au diamètre de la cheminée.

Les tableaux 4.4 et 4.5 présentent les valeurs de soufflerie et de terrain des paramètres de modélisation d'un terrain en amont dégagé et du bâtiment du Faubourg au vent du bâtiment BE, respectivement. Il convient de noter que le critère relatif au nombre de Reynolds de la cheminée n'était pas toujours respecté. Pour la valeur la plus faible de M (c.-à-d. vitesse d'évacuation minimale), la valeur de Re_s était d'environ 1 700 pour les essais dans le sillage du Faubourg, et de 1 880 pour les essais en présence d'un terrain en amont dégagé. Étant donné que la plupart des essais modélisés respectaient le critère relatif à Re_s, il n'a pas été jugé nécessaire d'utiliser un dispositif générateur de turbulence dans la cheminée de la soufflerie.

La valeur minimale du nombre de Reynolds du bâtiment modélisé (Re_b) était de 20 000, soit de loin supérieure à la limite généralement admise de 11 000. Meroney (2003) a toutefois fait valoir que ce critère devait être considéré avec un certain scepticisme, puisqu'il a été défini à partir de données restreintes. Quoi qu'il en soit, on a présumé, dans le cadre de la présente étude, que la dispersion du panache était indépendante de Re_b.

Les données de concentration sont exprimées sous forme de coefficient de concentration non dimensionnel (K), défini comme suit :

$$K = CU_H H^2(10^{-6})/Q_{SF6}$$

où C correspond à la concentration en ppb et Q_{SF6} au débit d'émission de SF_6 en m^3/s^{-1}.

Degré d'incertitude des mesures

Comme nous l'avons déjà mentionné, la précision du chromatographe en phase gazeuse était de ±5 %. L'anémomètre à hélice Young placé sur le toit du Faubourg avait une précision rapportée de ±0,3 m/s^{-1} pour la vitesse du vent, et de ±3° pour la direction du vent. Quant à l'anémomètre sonique Gill utilisé lors des essais en présence d'un terrain en amont dégagé (et placé sur le toit du bâtiment BE), il avait une précision rapportée de ±3 % pour la vitesse du vent, et de ±3° pour la direction du vent.

On présume qu'une incertitude de ±0,1 m/s^{-1} (±0,6 % - 1,2 %) est associée aux mesures de vitesse d'évacuation de la cheminée. Cela dit, le facteur d'impulsion affiche une incertitude beaucoup plus importante (±10 %), puisque l'anémomètre se trouvait à une certaine distance de la cheminée.

Les courbes d'étalonnage du chromatographe en phase gazeuse Varian et des autres instruments sont fournies à l'annexe C.

Tableau 4.4 Paramètres expérimentaux des essais en présence d'un terrain en amont dégagé

EMPLACEMENTS DE CHEMINÉE 1, 2 ET 4		
Paramètres	**Soufflerie[m]**	**Terrain**
$Z_{réf}$ (m)	0,6	120[e]
$U_{réf}$ (m/s)	12,5	2,6 - 5,7[m]
U_{BE} (m/s)[a]	4,7 - 7,5	1,5 - 3,3[m]
Z_o (m)	0,66	0,5 - 1,5[c]
L_x (m)	0,4	100[c]
$\sigma_u/U_{(BE)}$	0,18 - 0,40	0,40 - 0,48[m]
Re_b	20 000 - 33 000	1 250 000 – 2 750 000[m]
Re_s	1 880 - 9 500	187 000 – 472 000[m]

Tableau 4.5 Paramètres expérimentaux des essais avec le bâtiment du Faubourg en amont

Emplacements de cheminée 3 et 4		
Paramètres	**Soufflerie[m]**	**Terrain**
$Z_{réf}$ (m)	0,6	120[e]
$U_{réf}$ (m/s)	12,5	5,2 – 9[e]
U_{FB} (m/s)[b]	10,5	4,1 - 7,0[m]
Z_o (m)	0,66	0,5 - 1,5[c]
L_x (m)	0,4	100[e]
$\sigma_u/U_{(FB)}$	0,12 - 0,13	0,25 - 0,36[m]
Re_b	**	**
Re_s	1 700 - 6 000	187 000 – 472 000[m]

** Sans objet : bâtiment émetteur est dans le sillage d'un bâtiment en amont plus élevé

a U_{BE} (m/s) est mesuré à 20 m (en grandeur réelle) du niveau du sol

b U_{FB}(m/s) est mesuré à 55 m (en grandeur réelle) du niveau du sol

c Selon Wieringa (1993)

e Estimé

m Mesuré

Figure 4.1 Bâtiment BE, Centre des études sur le bâtiment, Université Concordia, Montréal, vu de l'ouest.

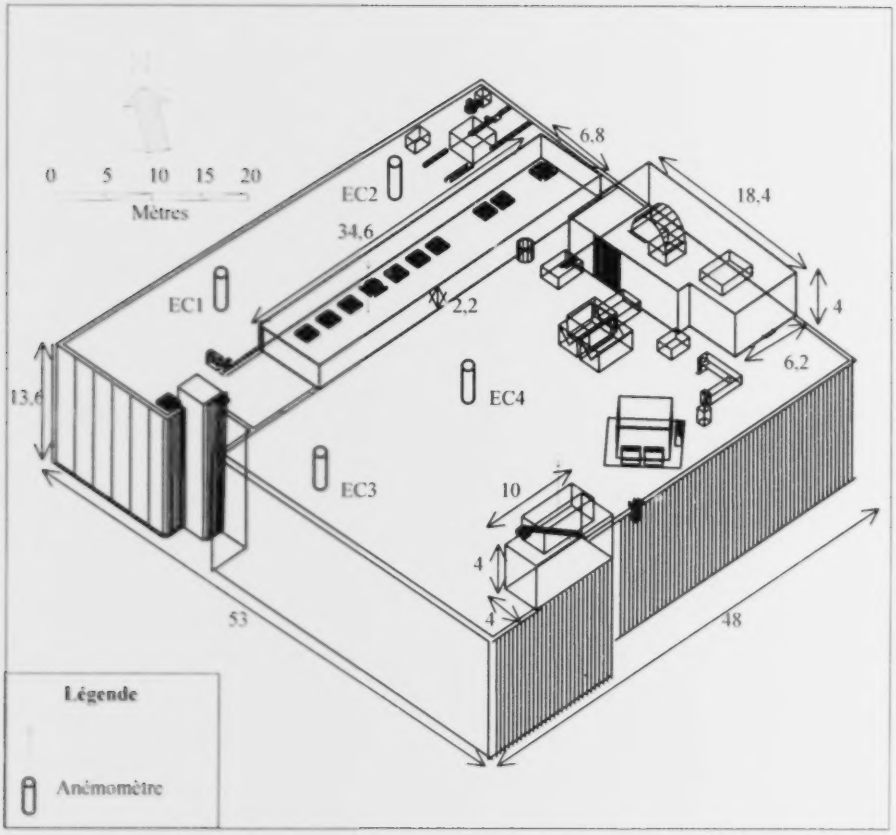
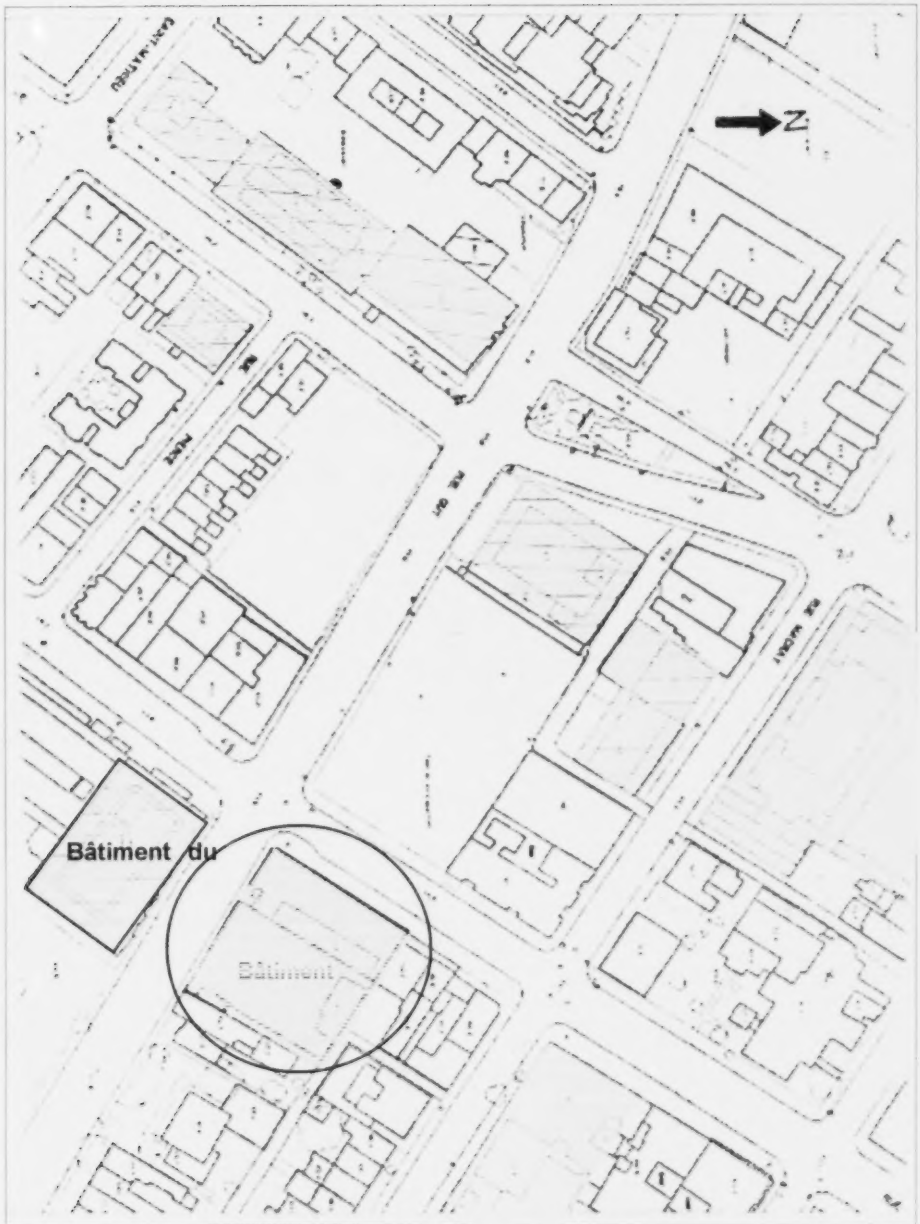


Figure 4.2 Vue détaillée du bâtiment BE montrant l'emplacement des cheminées, des anémomètres et des diverses structures de toit (dimensions en mètres).



* Échelle 1:1650

Figure 4.3 Emplacement du bâtiment BE et des constructions avoisinantes – les bâtiments ombragés ont une hauteur variant entre 30 m et 65 m.

a) Ouest

b) Nord-ouest

Figure 4.4 Photos des abords au vent à l'ouest et au nord-ouest.

c) Sud-ouest

d) Sud-est

Figure 4.4 Photos des abords au vent à au sud-ouest et au sud-est.

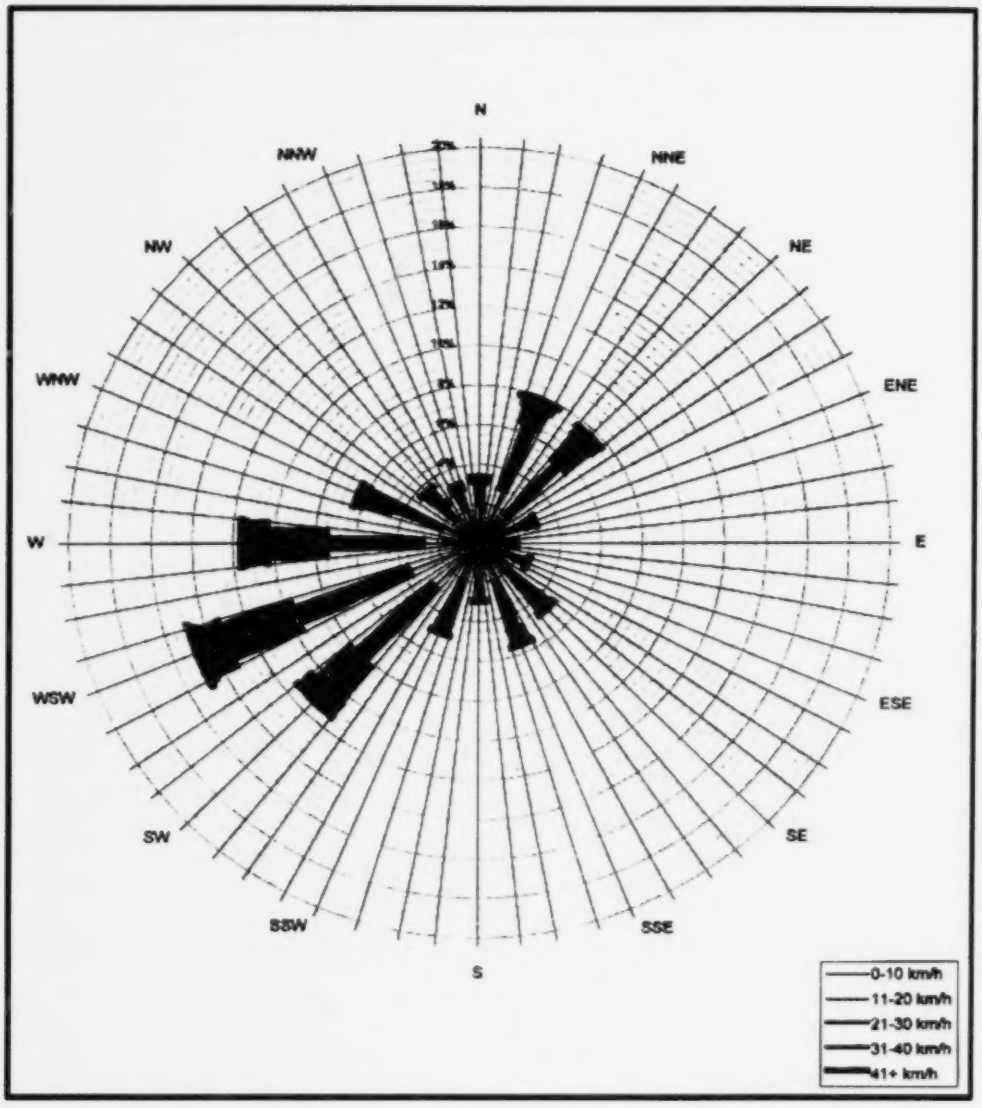


Figure 4.5 Diagramme de la fréquence des vents à Montréal (@ z = 300 m), d'après les données de l'aéroport de Dorval.

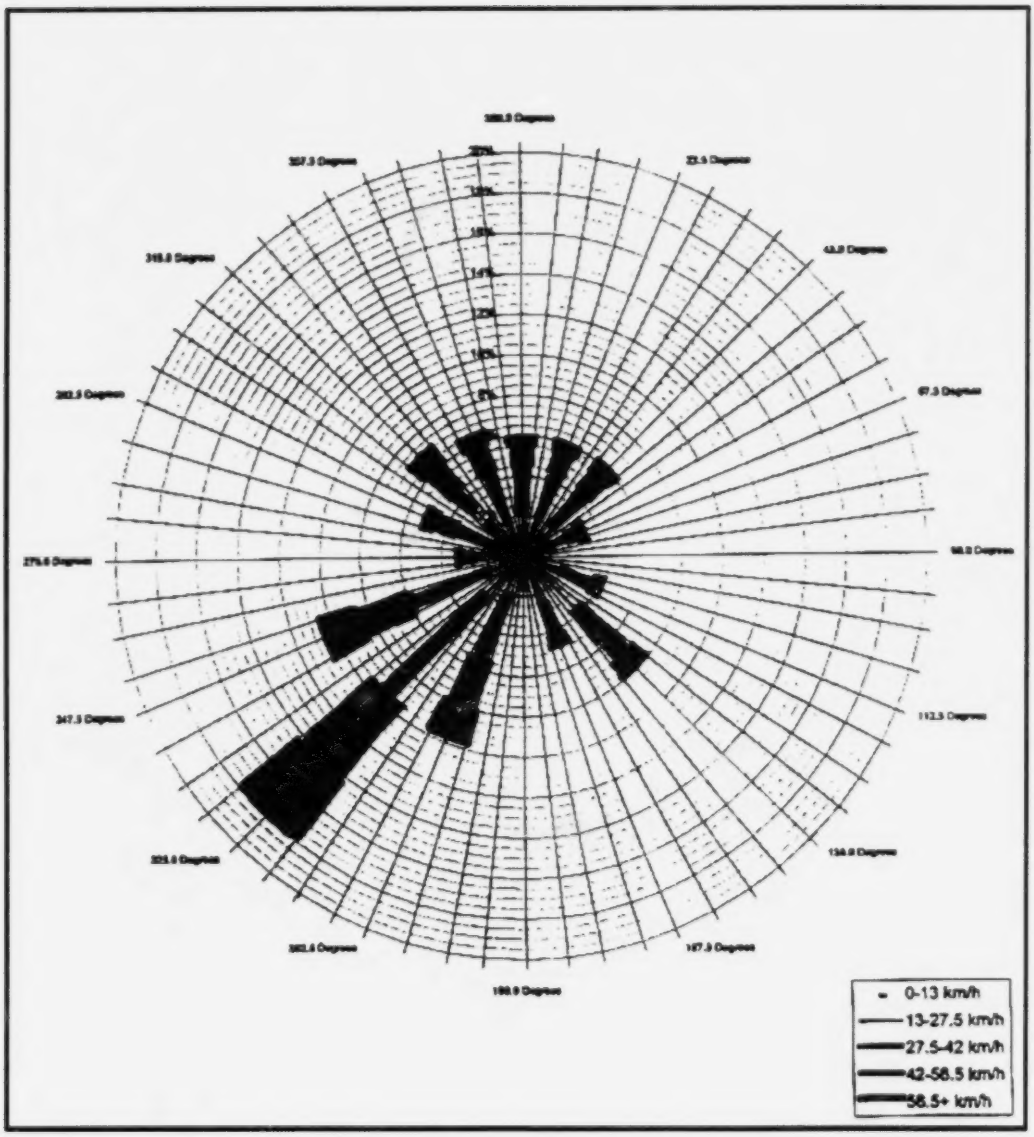


Figure 4.6 Diagramme de la fréquence des vents à Montréal (@ z = 300 m), d'après les données de l'observatoire de l'Université McGill.

Figure 4.7 Photo montrant les abords construits du bâtiment BE (prise de l'édicule du Faubourg en regardant vers le sud-ouest).

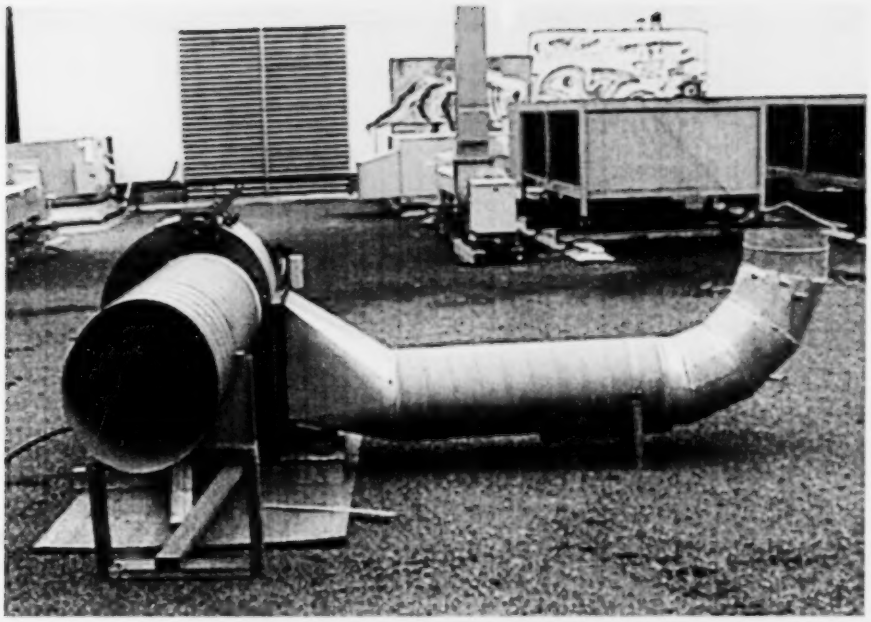


Figure 4.8 Photo de la cheminée d'essai installée sur le bâtiment BE (cheminée basse – h_s = 1 m).

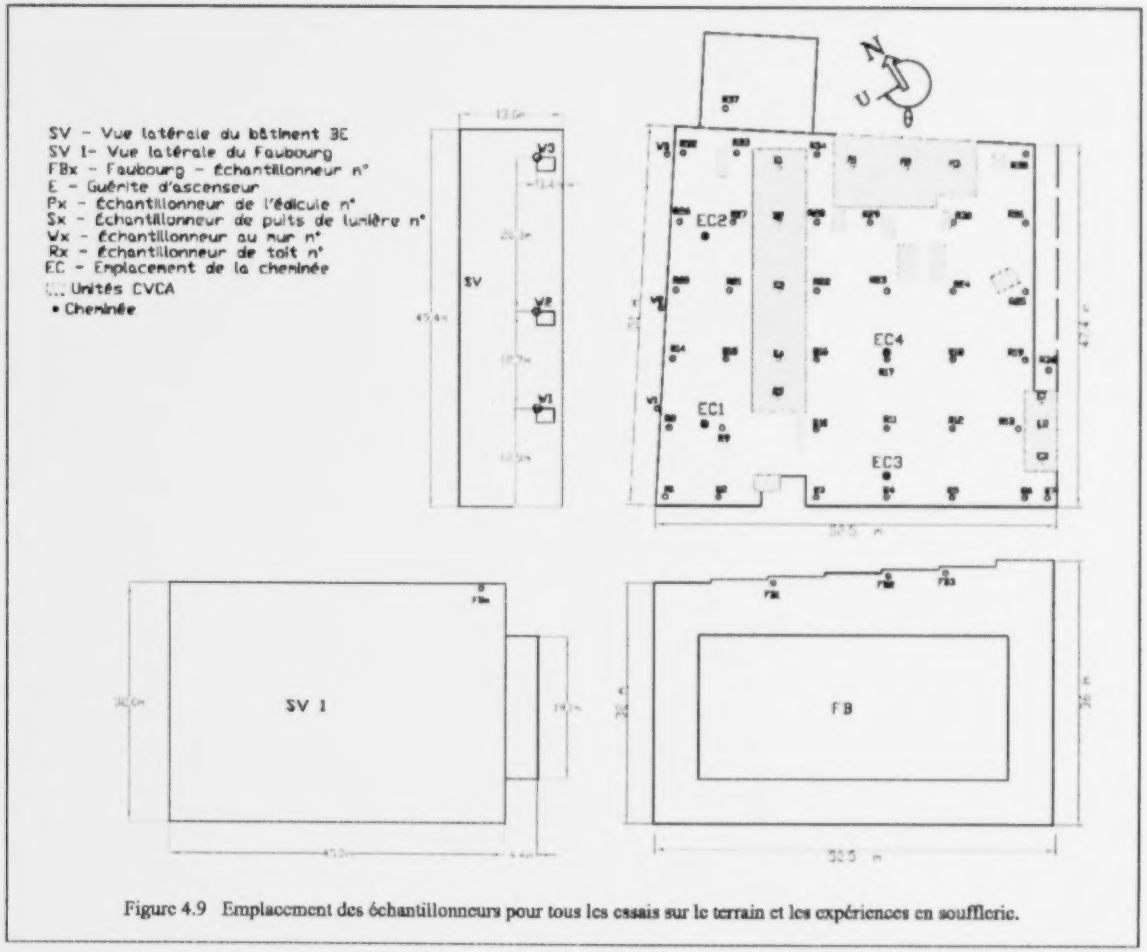


Figure 4.9 Emplacement des échantillonneurs pour tous les essais sur le terrain et les expériences en soufflerie.

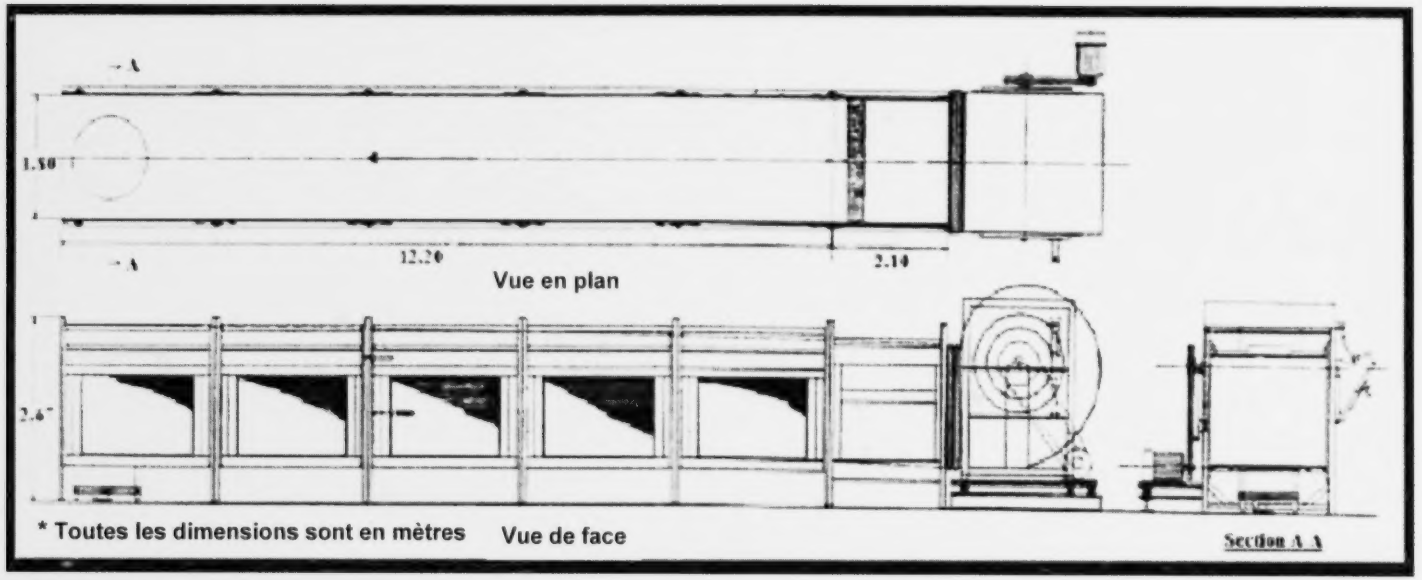
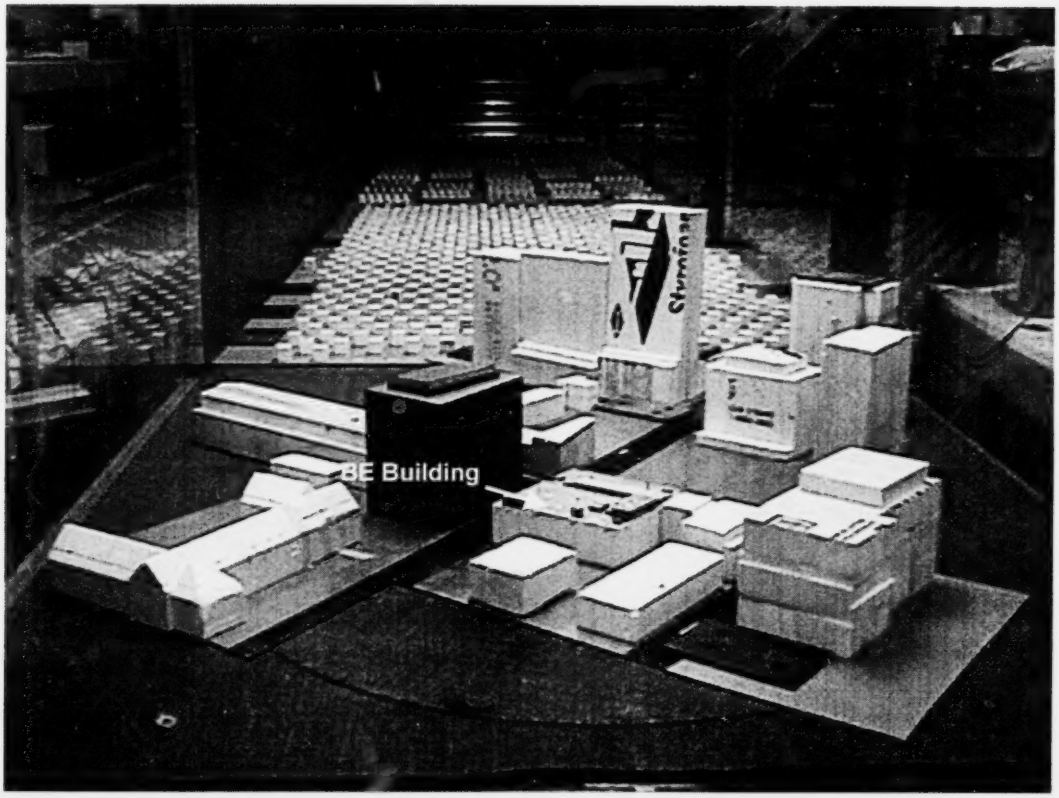
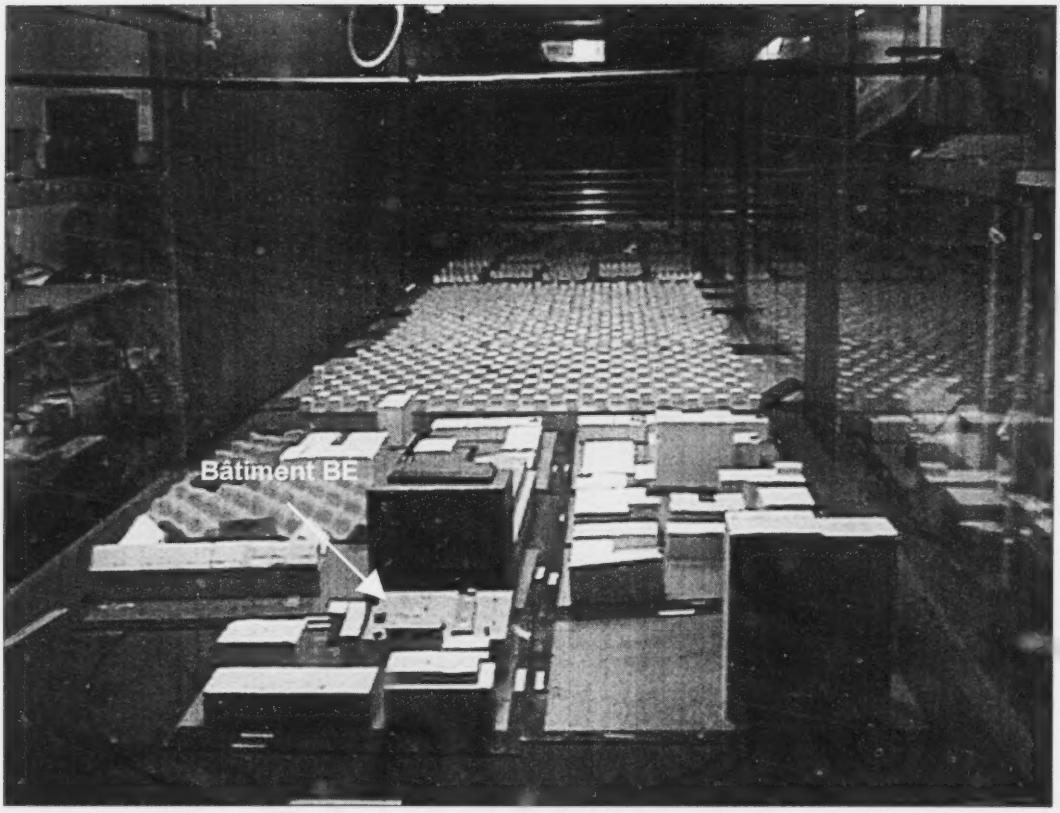


Figure 4.10 La soufflerie à couche limite de l'Université Concordia



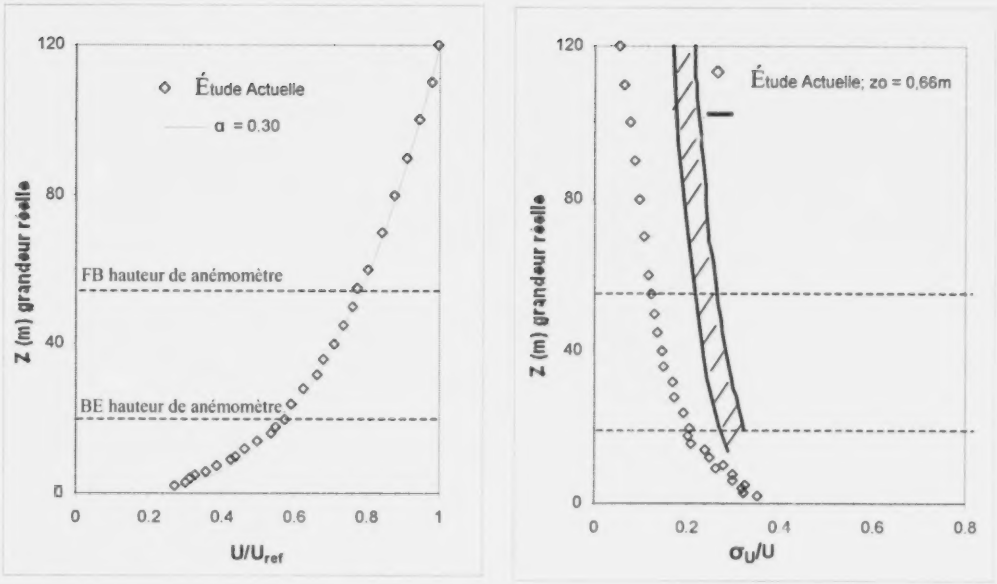
a) direction éolienne de l'ouest

Figure 4.11 Photo de l'aménagement de la soufflerie.



a) direction éolienne de sud-ouest

Figure 4.11 Photo de l'aménagement de la soufflerie.



a) Vitesse éolienne moyene

b) Intensité de la turbulence

Figure 4.12 Profils verticaux de la vitesse éolienne moyenne et de l'intensité de la turbulence obtenus en milieu urbain dans la soufflerie à couche limite de l'Université Concordia.

Chapitre 5

Résultats d'expérience

Ce chapitre porte sur les résultats des expériences effectuées sur le terrain et en soufflerie. Il comporte deux sections :

5.1 Essais en présence d'un terrain en amont dégagé ; (emplacements de cheminée 1, 2 et 4)

5.2 Essais en présence d'un haut bâtiment directement en amont (au vent) du bâtiment émetteur (emplacements de cheminée 3 et 4).

Les résultats présentés à la section 5.1 se prêtent à une comparaison avec les modèles gaussiens de dispersion recommandés par l'ASHRAE (2003), puisque le panache se déplaçait dans la direction du vent. En pareil cas, les concentrations aux récepteurs dépendent en grande partie de la distance de ces derniers par rapport à la source émettrice. Par contre, dans le cas des essais décrits à la section 5.2, le panache se trouvait emprisonné dans la zone voisine du sillage du bâtiment au vent. Dans de telles circonstances, le panache se déplace d'abord en amont avant d'être dispersé par la turbulence du sillage. Or, vu la complexité de l'écoulement dans le sillage des bâtiments, les modèles gaussiens de dispersion ne permettent pas de prédire les profils de dilution sur le toit du bâtiment émetteur et au mur sous le vent du bâtiment adjacent. Un modèle gaussien complexe de sillage élaboré par Wilson *et al.* (1998) avait une capacité de prédiction relativement faible, si ce n'est qu'il permettait de dégager le schéma de dilution associé aux variations de M.

Les résultats seront présentés suivant le plan que voici. Tout d'abord, nous fournirons un aperçu des données de terrain en mettant l'accent sur l'influence du facteur d'impulsion (M) et de la hauteur de la cheminée sur les données de concentration. Ensuite, nous comparerons les résultats obtenus sur le terrain aux modèles de dispersion disponibles. Enfin, nous comparerons les données de terrain aux résultats obtenus en soufflerie.

Les données de concentration seront exprimées sous deux formes :

concentration normalisée (k),

dilution (D).

La concentration normalisée est généralement utilisée dans les publications scientifiques [p. ex., Snyder (1994)]. Par contre, les modèles de dispersion de l'ASHRAE (1999 et 2003) reposent sur la dilution.

5.1 Essais en présence d'un terrain en amont dégagé

Cette section présente les données d'essais où le terrain en amont était relativement dépourvu d'obstacles :

Cheminée 1 (tous les essais)
Cheminée 2 (tous les essais)
Cheminée 4 (21 nov. 2002 seulement)

La figure 4.4 présente des photos du terrain au vent pour chaque emplacement de cheminée.

Dans chacun des cas, nous supposons que les bâtiments au vent n'ont pas une influence significative sur la trajectoire du panache, quoiqu'ils puissent en accroître l'étalement.

5.1.1 Aperçu des données de terrain (terrain en amont dégagé)

En tout, treize essais de 50 minutes chacun ont été effectués en présence d'un terrain en amont dégagé (voir tableau 4.1). Dans cette section, les résultats types de sept de ces essais sont présentés. Le tableau 5.1 présente les conditions météorologiques et les paramètres des cheminées pour les essais sélectionnés. Les vents étaient généralement du sud-ouest ($228° < \theta < 260°$) pour la cheminée 1, du nord-ouest ($280° < \theta < 355°$) pour la cheminée 2 et du sud-est ($\theta \sim 160°$) pour la cheminée 4.

Les figures 5.1 et 5.2 présentent les données éoliennes recueillies par l'anémomètre sonique à intervalles de 5 minutes pour les essais effectués avec la cheminée 1 et la cheminée 2, respectivement. Elles présentent également les données relatives à la vitesse et à la direction du vent telles que mesurées à l'aéroport de Dorval à une hauteur de 10 m. Une courbe de vitesse éolienne supplémentaire fait état des valeurs estimées de U au bâtiment BE, selon les mesures effectuées à Dorval. En général, la direction éolienne enregistrée à Dorval correspond bien aux valeurs de θ observées au bâtiment BE. De même, les vitesses éoliennes de Dorval, corrigées en fonction de la hauteur et du relief, se comparent bien aux données du bâtiment BE.

Les essais étaient destinés à être effectués par vents modérés à forts pour assurer une stabilité atmosphérique neutre, puisque ces conditions sont celles qu'on simule en soufflerie et que présument les modèles de dispersion de l'ASHRAE. Un autre avantage lié à des conditions atmosphériques neutres tient au fait que les variations de direction éolienne au cours d'un essai de 50 minutes sont généralement faibles, comparativement à celles qu'on peut constater dans des conditions stables ou instables. Bien que de faibles vitesses éoliennes (< 2 m/s) aient été enregistrées au bâtiment BE lors de certains essais (p. ex., le 28 juin 2001 et le 29 août 2001),

nous présumons de conditions neutres ou presque neutres pour tous les essais puisque la vitesse du vent à Dorval dépasse généralement 4 m/s. Les faibles vitesses éoliennes enregistrées au bâtiment BE s'expliquent principalement par l'effet de paravent des bâtiments en amont et du mont Royal.

Tableau 5.1 Données éoliennes et paramètres des cheminées pour les essais sélectionnés en présence d'un terrain en amont dégagé

Date	N° de l'essai	Emplacement de la cheminée	Hauteur de la cheminée (m)	M	U_H (m/s)	θ (degrés)
12/10/00	1	EC1	1	5,4	3,3	240
	2	EC1	1	2,5	3,0	242
15/11/00	1	EC1	3	2,5	3,0	267
30/10/01	1	EC2	1	3,4	2,3	305
	2	EC2	3	3,6	2,1	316
21/11/02	1	EC4	1	5,6	1,5	160
	2	EC4	1	10,5	1,7	160

Il convient également de noter que d'importantes fluctuations de U et de θ ont été enregistrées par l'anémomètre du bâtiment BE le 12 octobre 2000. Nous croyons que les pointes affichées par les données peuvent s'expliquer par des changements occasionnels dans la direction du vent étant donné que le Faubourg se trouve au vent du bâtiment BE. Les mesures de concentration obtenues au cours de ces périodes ne sont pas représentatives d'une configuration de terrain en amont dégagé, et n'ont donc pas été incluses dans la présente analyse.

La figure 5.3 présente les données relatives à la vitesse du vent pour les essais effectués avec la cheminée 4 le 21 novembre 2002. Ces données ont été recueillies avec un anémomètre à coupelles situé sur l'édicule de l'ascenseur haute de 4 m qui se trouve dans l'angle sud du

bâtiment BE. Les vitesses éoliennes enregistrées se comparent bien aux données de Dorval corrigées pour la hauteur et le relief.

5.1.2 Effet de M (données de terrain)

L'effet du facteur d'impulsion ($M = w_e/U_H$) a été étudié lors des essais sur le terrain en modifiant la vitesse d'évacuation. De façon générale, un 1er essai de 50 minutes était effectué pour une valeur faible ou élevée de w_e (~7,5 m/s ou ~17,5 m/s), et le 2^e essai de 50 minutes était effectué en utilisant l'autre valeur de w_e. Lors de certains essais, surtout ceux effectués par vent faible ($U_H < 2,5$ m/s), la vitesse éolienne variait considérablement d'un essai à l'autre, et M de même, par conséquent.

Au moment de comparer les données de deux essais effectués le même jour, il a été implicitement entendu que les conditions éoliennes étaient semblables lors des deux essais. Cette hypothèse n'était pas toujours valide, cependant. La direction éolienne variait considérablement lors de certains essais, de sorte que l'influence de M sur k ne pouvait être évaluée en pareil cas. Par exemple, la figure 5.4 présente la variation de θ dans le temps pour les deux essais de 50 minutes effectués le 28 juin 2001 avec la cheminée 2. Dans ce cas précis, la direction éolienne moyenne pour les deux essais différait d'environ 20°. Dans chaque essai, l'écart entre les valeurs de θ enregistrées aux 5 minutes était d'environ 50°. En conséquence, il est probable qu'une part importante de la variation de k soit due à la variation de θ plutôt qu'à celle de M.

Les essais du 12 octobre 2000 (EC2) se prêtent à un examen de l'effet de M sur k. Dans ce cas précis, la direction éolienne n'a pas varié de façon significative au cours de la plupart des

périodes d'échantillonnage, abstraction faite des importantes fluctuations de θ enregistrées par intermittence (voir figure 5.1). Ces fluctuations sont presque certainement dues à un changement de direction du vent ayant fait en sorte que le bâtiment BE se trouve dans le sillage du Faubourg. Les périodes d'échantillonnage où des fluctuations extrêmes de θ ont été enregistrées n'ont pas été incluses dans l'analyse qui suit.

Les graphiques chronologiques types de k obtenus lors de l'essai du 12 octobre 2000 sont présentés à la figure 5.5. Les résultats affichés proviennent d'un échantillonneur situé tout près, à moins de 10 m de la cheminée sur le toit (R15), d'un échantillonneur moyennement distant situé sur le puits de lumière (S3), et d'un échantillonneur distant de plus de 40 m, sur l'édicule (P2). La figure 4.9 montre l'emplacement des échantillonneurs. L'emplacement des 15 échantillonneurs utilisés lors de chacun des essais sur le terrain est aussi précisé à l'annexe A.

La figure 5.5a montre qu'à l'échantillonneur de toit R15, situé près de la cheminée, à S ~ 9 m, le fait de doubler la vitesse d'évacuation (ou la valeur de M) entraîne une réduction comparable de k. La valeur moyenne de k à l'échantillonneur R15 au cours de la première heure ($w_é$ = 17,7 m/s et M = 5,42) était d'environ 1 500. Ce résultat fait pendant à une valeur de k de 3 000 au cours de la deuxième heure, alors que la vitesse d'évacuation se trouvait réduite ($w_é$ = 7,4 m/s et M = 2,45).

Plus loin de la cheminée, l'influence de M semble être négligeable. La figure 5.5b présente les valeurs de k recueillies par l'échantillonneur S3, situé sur le puit de lumière à S ~ 20 m. Les valeurs moyennes de k étaient d'environ 1 500 dans chacun des cas. Les valeurs relativement élevées de k recueillies à S3 lors de l'essai à fort débit peuvent être dues à la position élevée de

l'échantillonneur. Puisque l'échantillonneur se trouvait à une hauteur de 2 m au-dessus du toit, l'effet d'élévation du panache est faible comparativement à celui que nous avons observé aux échantillonneurs à la hauteur du toit.

La figure 5.5c présente les données de concentration enregistrées à l'un des échantillonneurs les plus éloignés (P2), situé sur l'édicule haut de 4 m qui se trouve du côté nord-est du bâtiment (S ~ 43 m). Dans ce cas précis, les valeurs de k obtenues avec un fort débit d'évacuation (M = 5,4) étaient en fait légèrement plus élevées que celles obtenues lors de l'essai à faible débit (M = 2,4). La valeur moyenne de k lors de l'essai à fort débit était d'environ 350, tandis que lors de l'essai à faible débit, la moyenne était de k ~ 200. De même, aux échantillonneurs de toit situés près de l'édicule, les valeurs de k obtenues pour M = 5,4 étaient généralement plus élevées que celles obtenues pour M = 2,4. Cela indique que dans le cas des récepteurs élevés et (ou) éloignés, une vitesse d'évacuation élevée peut ne pas être avantageuse, et risque même d'aggraver la contamination des prises d'air frais. Dans le cas des récepteurs élevés, une augmentation de M a pour effet d'accroître l'élévation du panache due à l'impulsion du flux d'air, si bien que les récepteurs risquent d'entrer en contact avec le panache plus fréquemment que dans le cas d'une cheminée à faible M. Dans le cas des récepteurs éloignés à hauteur du toit, les concentrations liées à une cheminée à M élevé seront elles-mêmes relativement élevées lorsque le panache entrera en contact avec le toit.

La figure 5.6 présente un histogramme montrant l'effet de M sur les valeurs moyennes de k pour tous les échantillonneurs lors de l'essai du 12 octobre 2000. L'efficacité d'une vitesse d'évacuation élevée à réduire k près de la cheminée (S < 20 m) y est clairement démontrée. À plus grande distance, cependant, M ne réduit pas k, et peut même le faire augmenter.

Toute fluctuation de la vitesse du vent peut aussi provoquer des variations de M. Par conséquent, l'effet de M sur k peut être évalué en analysant les données d'un seul essai de 50 minutes au cours duquel la vitesse du vent a fluctué de façon marquante. Les figures 5.7 et 5.8 présentent des histogrammes de k pour les essais du 12 octobre 2000 (heure 1) et du 15 mai 2002. Tel que prévu, les résultats révèlent un effet relativement marqué de M près de la cheminée et un effet moins marqué aux échantillonneurs éloignés.

5.1.3 Effet de la hauteur de la cheminée (données de terrain)

L'influence de la hauteur de la cheminée sur les valeurs de k a été étudiée lors des essais sur le terrain en utilisant une cheminée de 1 m et une autre de 3 m. Des expériences en soufflerie ont plus tard été effectuées pour obtenir des données relatives à d'autres hauteurs de cheminée. Les résultats en sont présentés à la section 5.1.5.

Comme dans le cas de l'effet de M sur k, l'analyse de l'effet de la hauteur de la cheminée a été compromise par l'importante variation de la direction du vent lors d'un des essais. De plus, les variations de vitesses éoliennes ont aussi provoqué une variation significative de M. On le voit clairement dans les figures 5.9 et 5.10, qui présentent les séries chronologiques de θ et de M pour les essais du 30 octobre 2001 (EC 2). Au cours d'un essai de 50 minutes, la direction éolienne a varié de plus de 60 degrés, tandis que la valeur de M est passée de 2,2 à 6,2.

Compte tenu de la variation de θ et de M, la taille de l'échantillon utilisé pour étudier l'effet de la hauteur de la cheminée était plutôt faible. La figure 5.11 présente un histogramme des valeurs de k obtenues lors des essais du 30 octobre 2001, pour $n = 3$ (3 périodes de 5 minutes chacune), $M \sim 3$ et $\theta \sim 305$. Pour cet échantillon restreint, il appert que le fait d'augmenter la hauteur de la

cheminée de 1 m à 3 m réduit k de façon significative près de la cheminée (S < 20 m), par un facteur allant jusqu'à 5. Une certaine réduction de k est survenue à la plupart des autres échantillonneurs, bien que par un facteur de moins de 2 dans la plupart des cas.

Les résultats ont été comparables lors des essais du 15 novembre 2000 avec la cheminée 1. Les valeurs de k à la plupart des échantillonneurs étaient au plus haut lorsque la cheminée faisait 1 m. Le fait d'augmenter h_s à 3 m a eu pour effet de réduire k par un facteur inférieur à 2 à la plupart des emplacements.

5.1.4 Comparaison des dilutions de terrain aux estimations des modèles de l'ASHRAE

L'ASHRAE fournit plusieurs modèles visant à prédire la dilution du panache aux récepteurs au mur et sur le toit. Le modèle de l'ASHRAE (1999) présente des formules qui permettent de calculer la dilution minimale (D_{min}) autour des cheminées en effleurement du toit et la dilution critique (D_{cnt}) lorsque $h_s > 0$. Le modèle de l'ASHRAE (2003) recommande une nouvelle formule de dilution, fondée sur le modèle gaussien de dispersion, pour estimer la dilution au niveau du toit (D_r). Comme dans les modèles précédents, le modèle de l'ASHRAE (2003) estime la dilution sur la ligne médiane du panache.

Les modèles de dilution de l'ASHRAE ont été décrits au chapitre 3. Cependant, nous fournissons ci-dessous de plus amples détails ainsi que les hypothèses retenues dans le cadre de la présente étude.

Modèle D_r de l'ASHRAE (2003) Hypothèses : hauteur de la cheminée = 0, aucune correction du temps de moyennage

Hypothèse n° 1 : $h_s = 0$

Au moment d'appliquer le modèle D_r (équations 3-13 à 3-16), la hauteur finale de l'élévation du panache (h), doit être précisée :

$$h = h_s + h_r - h_d$$

où h_s correspond à la hauteur de la cheminée, h_r à l'élévation du panache, et h_d au rabattement du panache dans le sillage de la cheminée. Selon l'ASHRAE (2003), la conception adéquate d'une cheminée implique que h doit être plus élevée que la plus faible hauteur requise pour éviter un récepteur à un emplacement critique, en présumant que le panache a une pente de 5:1 (voir figure 3.3). La plus faible hauteur en question est désignée h_{small}.

L'ASHRAE (2003) stipule que :

« Si la hauteur du panache est inférieure à h_{small} mais plus élevée que tout obstacle ou zone de recirculation sur le toit (h_{top} de la figure 3.2), seule la portion de la hauteur physique de la cheminée qui excède h_{top} doit être utilisée pour calculer la hauteur du panache, plutôt que la pleine hauteur physique de la cheminée. »

Lorsque la hauteur du panache n'atteint pas h_{top}, l'ASHRAE (2003) recommande l'utilisation d'un autre modèle de dilution (D_s) ne tenant pas compte de l'élévation du panache.

À des fins de conception, la valeur de h_{small} dépend de l'emplacement du récepteur critique (prise d'air neuf). Elle dépend également de la vitesse d'évacuation et de la vitesse éolienne prévue, puisque ces paramètres déterminent l'élévation minimale du panache (voir équation 3-7). Cependant, dans le cadre de la présente étude, on présume tout simplement que h_{small} est élevée, comme ce serait le cas pour une prise d'air au mur sous le vent, de sorte que h est toujours inférieure à h_{small}. On présume en outre que l'élévation du panache due à l'impulsion du flux d'air dépasse toujours la hauteur maximale des zones de recirculation du toit (h_{top}). En conséquence, puisque $h_{top} < h < h_{small}$, la hauteur de la cheminée n'a pas été incluse dans le calcul de h.

Les zones de recirculation estimées correspondant aux essais effectués aux emplacements de cheminée EC1 et EC2 sont présentées à la figure 5.12. Les valeurs estimées de h_{small} sont fournies pour les prises d'air A, B et C, situées au mur sous le vent du puits de lumière, de l'édicule et du bâtiment principal, respectivement.

Notez que cette figure s'applique strictement aux vents à peu près normaux au mur nord-ouest du bâtiment. Or, cette condition n'était généralement pas remplie lors des essais à EC1 (12 octobre

2000 et 15 novembre 2000), où des vents obliques ont vraisemblablement donné lieu à des écoulements tourbillonnaires coniques aux bords antérieurs du bâtiment et des structures de toit. Néanmoins, la figure 5.12 servira à l'analyse des essais aussi bien à EC1 qu'à EC2, suivant l'hypothèse que les dimensions des zones de recirculation relatives aux essais à EC1 étaient plus ou moins identiques à celles de la figure.

Il convient finalement de noter que la valeur de h utilisée dans l'équation 3-13 est tenue pour correspondre à la hauteur du panache par rapport à la hauteur du récepteur. Bien que l'ASHRAE (2003) ne fasse pas mention de récepteurs élevés, dans la présente étude, la valeur de h est obtenue en soustrayant la hauteur du récepteur (sur une structure de toit) de la hauteur du panache. Ainsi, pour un panache d'une hauteur de 10 m au-dessus du toit principal, h = 10 m pour les récepteurs de toit et h = 6 m pour les récepteurs situés sur l'édicule haut de 4 m.

La figure 5.12 indique que le panache doit s'élever à une hauteur de 13,2 m pour éviter d'être entraîné dans une quelconque zone de recirculation ou de sillage du toit. Cette hauteur est représentée par h_{small} pour une prise d'air au mur sous le vent.

Lors de l'essai du 21 novembre 2002, la cheminée était à EC4, et les vents venaient du sud-est. La figure 5.13 présente les zones de recirculation pour ce cas précis. Notez que, comme EC4 se trouve près du centre du toit, la hauteur de panache minimale requise pour éviter toute zone de recirculation (h_{small} = 9,6 m) est inférieure à celle des cheminées à EC1 et à EC2, soit h_{small} = 13,2 m. EC4 diffère de EC1 et de EC2 en ce qu'il ne se trouve pas dans la zone de recirculation créée à partir du bord antérieur du bâtiment.

Hypothèse n° 2 : aucune correction du temps de moyennage

Le modèle D_r suppose un temps de moyennage de 2 minutes. Les valeurs d'étalement latéral du panache sont corrigées pour d'autres temps de moyennage en appliquant la loi de puissance 0,2 (voir équation 3-14). Toutefois, lorsque l'extrémité de la cheminée et le récepteur se trouvent dans la même zone de recirculation, on ne s'attend pas à ce que la dilution soit sensible au temps de moyennage [ASHRAE (2003)]. Dans le cadre de la présente étude, puisque certains échantillonneurs se trouvaient dans une zone de recirculation du toit par rapport à la cheminée, aucune correction du temps de moyennage n'a été effectuée. Une telle correction aurait de toute façon été minime, puisque le temps d'échantillonnage réel était de seulement 5 minutes.

Modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) Hypothèses : hauteur de la cheminée = 0, aucun temps de moyennage

correction, $B_l = 0{,}059$.

Hypothèse n°1 : $h_s = 0$

Le modèle D_{min} est applicable aux conduits d'évacuation en effleurement du toit et aux cheminées dont la hauteur ne dépasse pas celle des structures de toit [ASHRAE (1999)]. Dans la présente étude, même si la cheminée de 3 m était légèrement plus élevée que le puits de lumière du toit, la hauteur effective de la cheminée est tenue pour nulle aussi bien pour la cheminée de 3 m que pour celle de 1 m.

Hypothèse n°2 : aucune correction du temps de moyennage

Le modèle D_{min} suppose un temps de moyennage de 10 minutes. Toutefois, lorsque l'extrémité de la cheminée et le récepteur se trouvent dans la même zone de recirculation, on ne s'attend pas à ce que la dilution soit sensible au temps de moyennage [ASHRAE (1999)]. Dans le cadre de la présente étude, puisque certains échantillonneurs se trouvaient dans une zone de recirculation du toit par rapport à la cheminée, aucune correction du temps de moyennage n'a été effectuée.

Hypothèse n°3 : $B_l = 0{,}059$

Le paramètre de dilution en fonction de la distance (B_l) dépend du degré de turbulence du vent en amont, tel qu'illustré par l'équation 3-12. La valeur de conception recommandée pour B_l en zone urbaine est de 0,059, suivant l'hypothèse que $\sigma_\theta = 15°$. Bien que σ_θ n'ait pas été directement mesuré sur le bâtiment BE, les valeurs d'intensité élevées des turbulences longitudinale et latérale enregistrées lors des essais indiquent que $\sigma_\theta > 15°$. Néanmoins, la valeur par défaut de B_l a été retenue afin d'obtenir des estimations de dilution prudentes.

Comparaison des données de terrain aux modèles de dilution de l'ASHRAE

Les données de terrain des essais effectués aux emplacements de cheminée EC1, EC2 et EC4 ont servi à l'évaluation des modèles de l'ASHRAE. Il est à noter que les modèles de l'ASHRAE ne sont pas applicables aux essais à EC3, effectués alors que le bâtiment du Faubourg se trouvait au vent. Sauf pour l'essai à EC4 (21 novembre 2002), les essais sélectionnés ont généralement été effectués par vents forts.

La figure 5.14a présente les données de dilution aux 5 minutes tracées par rapport à la distance de la cheminée, située à EC1. Les données en question ont été recueillies le 12 octobre 2000 avec la

cheminée de 1 m et M = 5,5. Sont également représentées les courbes de D_r de l'ASHRAE (2003) pour les récepteurs du toit et du puits de lumière, de même que la courbe de D_{min} de l'ASHRAE (2001).

Des valeurs de dilution relativement faibles (100 < D < 200) ont été enregistrées près de la cheminée (S ~ 10 m). À l'échantillonneur le plus éloigné, situé sur l'édicule haut de 4 m, la dilution moyenne lors de l'essai était d'environ 1 000.

En général, le modèle D_{min} fournit une estimation qui se situe à la limite inférieure des données, bien que les données de dilution obtenues à l'un des échantillonneurs du toit et à l'un des échantillonneurs du puits de lumière aient été inférieures aux valeurs estimées. En revanche, la courbe de D_r relativement aux échantillonneurs du toit surestime considérablement les valeurs de dilution observées près de la cheminée (S < 25 m). L'élévation réelle du panache dans ce cas précis pourrait avoir été inférieure à celle prévue par le modèle dû à une forte turbulence dans la zone de recirculation créée à partir du bord antérieur du bâtiment. Il est à noter que la courbe de D_r tracée pour les échantillonneurs du puits de lumière reflète bien les données de terrain. La dilution moindre associée aux échantillonneurs du puits de lumière s'explique par la valeur moindre de h, soit la hauteur du panache au-dessus de la surface du toit sur lequel les échantillonneurs se trouvaient.

La figure 5.14b présente les résultats des essais et les prédictions des modèles lorsque M est faible (EC1, M = 2,5). Dans ce cas précis, le modèle D_r fournit des estimations prudentes à l'égard des échantillonneurs aussi bien du toit que du puits de lumière – sous-estimant les

dilutions observées par un facteur d'environ 2 à la plupart des emplacements. La courbe de D_{min} reflète assez bien les données.

La figure 5.15 présente les données obtenues lors de l'essai du 15 mai 2002 avec la cheminée à EC1. Dans ce cas précis, la hauteur de la cheminée était de 3 m, et M = 2,5. Tous les modèles fournissent des estimations prudentes, puisque la hauteur de la cheminée n'a pas été prise en considération pour déterminer la hauteur du panache (h). La courbe de D_{min} fournit une limite inférieure raisonnable aux données dans le cas des échantillonneurs situés loin de la cheminée (S > 30 m), comparativement aux courbes du modèle D_r.

Les figures 5.16a et 5.16b présentent les données obtenues avec les cheminées de 1 m et de 3 m, respectivement, lors des essais du 30 octobre 2001 (EC2, M ~ 3,5). Les valeurs de dilution minimale enregistrées à chacune des distances étaient généralement similaires pour les deux cheminées. Cependant, la plus haute cheminée a fourni de nombreuses valeurs de D supérieures à 10 000, tandis que la dilution maximale pour la cheminée la plus courte était d'environ 7 000 à tous les emplacements.

La courbe de D_r pour les échantillonneurs du toit situés près de la cheminée (S < 10 m) fournit une estimation qui se situe à la limite inférieure des données. Par contre, pour S > 20 m, le modèle D_r sous-estime la dilution observée par un facteur d'au moins 5 aussi bien pour la cheminée de 1 m que pour celle de 3 m. Et les estimations de D_r pour les échantillonneurs du puits de lumière sont encore plus prudentes. Les estimations de D_{min} sont quant à elles moins prudentes, bien qu'elles sous-estiment toujours les données observées, cette fois par un facteur de

3. Il convient en outre de noter que la courbe de D_{min} modélise de façon plus précise l'effet de la distance sur la dilution que les courbes de D_r.

Les figures 5.17a et 5.17b présentent les données obtenues au cours des essais du 21 novembre 2002 avec la cheminée de 1 m à EC4 (M = 5,6 et M = 10,5). Il est à noter que les 3 échantillonneurs les plus éloignés de la cheminée étaient des échantillonneurs au mur ; leurs emplacements sont présentés à la figure 4.9. Lorsqu'on compare les deux ensembles de données, l'effet de M (vitesse d'évacuation) est évident. Près de la cheminée (S ~ 10 m), la dilution minimale à l'un des échantillonneurs du toit était d'environ 300 pour M = 5,6. Le fait d'augmenter la valeur de M à 10,5 a eu pour effet d'accroître la dilution minimale à cet échantillonneur par un facteur de 3 (D ~ 1 000). Plus loin de la cheminée, l'effet de M semble moins marqué. À S ~ 30 m, la dilution minimale obtenue pour M = 10,5 était d'environ 40 % plus élevée que pour M = 5,6. Cela semble justifier l'utilisation d'un modèle de dilution à deux composantes, comme D_{min}, qui tient compte de la dilution initiale près la cheminée et la dilution en fonction de la distance.

Le modèle D_{min} fournit une fois de plus une estimation qui se situe à la limite inférieure des données, bien que ses estimations soient trop prudentes près de la cheminée, du fait qu'il ne tient pas compte de la dilution apparente causée par l'élévation du panache. Les estimations du modèle D_r quant aux échantillonneurs du puits de lumière correspondent bien aux données observées lorsque M est élevé, mais elles s'avèrent par trop prudentes pour l'ensemble des données lorsque M = 5,6. Par contre, la courbe de D_r pour les échantillonneurs du toit correspond plutôt bien aux données observées lors M est faible. Cela dit, le modèle surestime la dilution aux échantillonneurs du toit lorsque M est élevé. Les valeurs estimées sont alors environ deux fois

plus élevées que les dilutions minimales mesurées à chaque emplacement, ce qui indique que le modèle a surestimé l'élévation du panache dans ce cas précis.

Le modèle D_r estime l'élévation du panache due à l'impulsion du flux d'air à l'aide de l'équation 3-7, définie par Briggs (1984) pour des cheminées isolées. Or, l'élévation réelle du panache durant certains essais pourrait avoir été inférieure à celle prévue par l'équation 3-7 du fait d'une forte turbulence du vent en amont ou du rabattement du panache causé par la présence des structures de toit. Il convient également de noter que le panache sur le terrain atteint sa hauteur finale à une certaine distance de la cheminée. Le modèle D_r présume toutefois que le panache s'élève instantanément, de sorte qu'il peut surestimer les valeurs de dilution près de la cheminée.

Finalement, il convient de noter que le modèle D_r aurait été encore moins conservateur pour la valeur élevée de M si la hauteur de la cheminée avait été prise en considération. Pour M = 10, la hauteur calculée du panache dépasse h_{small} à la plupart des récepteurs, si bien que la hauteur de la cheminée devrait être prise en compte dans le calcul de la hauteur du panache [ASHRAE (2003)]. Le cas échéant, les dilutions estimées auraient été plus élevées et les écarts entre les valeurs estimées et mesurées auraient eux-mêmes été plus élevés que ceux indiqués à la figure 5.17b.

5.1.5 Comparaison des valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie

Les données de concentration de terrain, exprimées en valeurs de k ($k = CU_H H^2(10^{-6})/Q_{SF6}$), ont été comparées aux valeurs de soufflerie pour les essais sélectionnés. Sauf indication contraire, les données de terrain utilisées dans cette étude comparative correspondent à des valeurs moyennes pour l'ensemble de chaque essai de 50 minutes. Dans certains cas, les données d'une ou plusieurs

périodes d'échantillonnage de 5 minutes ont été écartées en raison d'une importante variation de la direction ou de la vitesse du vent.

Des diagrammes montrant les distributions de k sur le toit du bâtiment BE, en soufflerie et sur le terrain, ont été produits pour tous les essais, et sont reproduits à l'annexe B. Il convient de noter que les données de soufflerie ont été obtenues pour un nombre restreint de valeurs de M (M = 2, 3, 4, 5, etc.) qui peuvent ne pas correspondre exactement aux valeurs de terrain. De même, la direction éolienne en soufflerie a été modifiée par incréments de 10°. En conséquence, dans la plupart des cas, le θ de la soufflerie ne correspond pas exactement à la valeur de terrain. Il convient aussi de noter que les valeurs de θ observées sur le terrain accusent une incertitude probable de ±5°.

Les figures 5.18 et 5.19 présentent les distributions de k obtenues en soufflerie et sur le terrain lors des 1er et 2^{e} essais, respectivement, du 30 octobre 2001 (EC2). La valeur de M était d'environ 3,5 lors des essais sur le terrain – légèrement plus élevée que la valeur en soufflerie (M = 3). La direction éolienne utilisée lors des deux essais en soufflerie était de 310°, ce qui représente moins de 6° d'écart par rapport aux valeurs de terrain estimées.

Les valeurs de k en soufflerie correspondent assez bien aux données de terrain, bien qu'un certain biais soit évident. Dans les deux cas (h_s = 1 m et 3 m), la soufflerie a surestimé k près de la cheminée, surtout au récepteur de puits de lumière le plus proche, S3. Par exemple, la figure 5.19 démontre que lorsque la hauteur de la cheminée était de 3 m, la valeur de k était de 705 à S3 dans la soufflerie. Or, la valeur de terrain correspondante était de 320. Des écarts similaires sont manifestes au bord sous le vent du bâtiment, où les valeurs de k en soufflerie aux

échantillonneurs de toit dans la trajectoire du panache étaient de 2 à 3 fois plus élevées que les valeurs de terrain. Ainsi le panache semble-t-il être moins dispersé en soufflerie que sur le terrain. C'est aussi ce qu'indiquent les valeurs légèrement plus élevées de k mesurées sur le terrain au bord sud-ouest du bâtiment, qui se trouve à bonne distance de la ligne médiane du panache. Le panache de terrain semble donc plus large que le panache de soufflerie. La soufflerie ne peut simuler les turbulences extrêmes, de sorte qu'il est impossible d'y reproduire les errements du panache constatés lors des essais sur le terrain, tel que soulevé par Wilson (1995), Higson *et al.* (1994) et Mavroidis *et al.* (2003).

La tendance des données de soufflerie à indiquer des concentrations plus élevées est évidente dans les figures 5.20 et 5.21, qui présentent le tracé des valeurs de k sur le terrain par rapport aux valeurs obtenues en soufflerie. Bien qu'un certain nombre de points de données se trouvent sur la diagonale de 45 degrés ou tout près, ce qui indique une correspondance appréciable, la majorité des points se situent sous cette droite dans chacun des cas.

Les résultats obtenus avec une cheminée de 1 m au centre du toit (EC4) lors de la 2^{e} heure de l'essai du 21 novembre 2002 sont présentés à la figure 5.22 ($M = 10{,}7$ et $\theta = 160°$). La comparaison entre les concentrations de terrain et de soufflerie est très bonne dans ce cas précis, l'écart entre les valeurs estimées et les valeurs observées étant inférieur à 10 % à plusieurs emplacements. Tout au plus, la valeur en soufflerie différait du k mesuré sur le terrain par un facteur de 2,5. Les concentrations obtenues en soufflerie aux trois échantillonneurs au mur sous le vent étaient environ deux fois plus élevées que les valeurs de terrain.

La figure 5.23 présente un diagramme de dispersion et un histogramme des valeurs de k reproduites à la figure 5.22. Le diagramme de dispersion révèle une corrélation remarquable entre les données de soufflerie et de terrain. Des résultats semblables ont été obtenus lors du 1er essai du 21 novembre 2002, et ce, pour une valeur de M moins élevée (M = 5).

Les concentrations de terrain et de soufflerie obtenues lors de l'essai du 15 mai 2002 sont présentées à la figure 5.24. Cet essai a été effectué avec une cheminée de 3 m à EC1. La valeur moyenne de M lors de cet essai de 50 minutes était de seulement 2,5 du fait d'une faible vitesse d'évacuation ($w_é$ = 7,6 m/s).

Les valeurs de k en soufflerie et sur le terrain se comparent généralement bien, même si la concordance n'est pas aussi bonne que lors de l'essai du 21 novembre 2002. Les concentrations estimées ne s'écartent généralement des valeurs de terrain que par un facteur inférieur à 2. Notez la concentration de terrain relativement élevée (k = 489) mesurée sur le toit près de la cheminée (R9), peut-être due au rabattement du panache à l'extrémité de la cheminée ou à une forte turbulence dans la zone de recirculation du toit. La valeur de soufflerie n'était que de 222, ce qui indique que l'élévation du panache était plus importante dans la soufflerie.

La figure 5.25 présente le diagramme de dispersion et l'histogramme des valeurs de k obtenues en soufflerie et sur le terrain pour l'essai du 15 mai 2002. Les écarts sont beaucoup plus importants dans ce cas que lors de l'essai du 21 novembre 2002. Cela peut être dû à une instabilité locale du vent en amont (aussi bien en soufflerie que sur le terrain) causée par les bâtiments avoisinants le 15 mai 2002. En revanche, le vent en amont lors des essais du 21 novembre 2002 peut avoir été plus stable, puisque le terrain est relativement dégagé au sud-est.

Quoique la soufflerie ait bien simulé les essais sur le terrain dans la plupart des cas, une concordance relativement faible a été obtenue lors des essais du 12 octobre et du 15 novembre 2000, effectués avec la cheminée à EC1. Les concentrations de terrain et de soufflerie obtenues lors du 1er essai le 12 octobre 2000 sont présentées à la figure 5.26. Dans ce cas précis, les concentrations de terrain mesurées aux échantillonneurs de toit près de la cheminée étaient élevées (p. ex., k = 1 660 à R15) du fait de la faible hauteur de la cheminée et de la force des vents. En revanche, les valeurs de k aux échantillonneurs de toit en soufflerie, toujours près de la cheminée, étaient faibles – parfois inférieures à 1 % des valeurs de terrain. Par contre, les valeurs de k obtenues sur l'édicule en soufflerie étaient de 3 à 4 fois plus élevées que les valeurs de terrain. Il appert que, dans ce cas, le panache de soufflerie était beaucoup plus élevé et moins latéralement dispersé que le panache de terrain.

Pour l'essai du 12 octobre 2000, la valeur minimale de Re_s fournie par le modèle était d'environ 3 000, ce qui satisfait au critère $Re_s > 2\,000$. Le critère relatif au nombre de Reynolds a également été respecté lors de l'essai du 15 novembre 2000 (Re_s min. ~ 5 700). Ainsi les écarts entre les concentrations de terrain et de soufflerie ne sont pas, pour ces essais, dus à l'écoulement laminaire de la cheminée modélisée. Ils semblent plutôt dus à la modélisation imparfaite du relief en amont. L'intensité de la turbulence mesurée en soufflerie à l'aide d'un thermo-anémomètre à l'emplacement de l'anémomètre de terrain (voir figure 4.2) n'était que de 18 %, soit de loin inférieure à l'intensité de turbulence > 40 % mesurée lors de l'essai du 12 octobre 2000. Étant donné que les configurations d'écoulement dans le voisinage des bâtiments sont fortement influencées par l'intensité de la turbulence du vent en amont, il n'est pas étonnant que les patrons de dispersion en soufflerie et sur le terrain présentés à la figure 5.26 soient aussi dissemblables.

D'autres essais en soufflerie seront effectués avec cette configuration pour déterminer la cause des écarts importants entre les valeurs de soufflerie et de terrain.

La figure 5.27 présente un diagramme de dispersion des valeurs de k sur le terrain et en soufflerie obtenues sur le toit du bâtiment BE pour tous les essais en présence d'un terrain en amont dégagé, sauf celui du 12 octobre 2000. Dans l'ensemble, les valeurs de soufflerie se comparent bien aux données de terrain. Environ 80 % des données de soufflerie se situent en effet à un facteur inférieur à ceux des données de terrain, tel qu'indiqué par les droites à 45° tracées de part et d'autre de la ligne médiane. Tel qu'expliqué précédemment, la simulation en soufflerie du 12 octobre 2000 n'était pas satisfaisante. La figure 5.27b révèle que la soufflerie a grandement sous-estimé les valeurs de k à la plupart des emplacements.

5.1.6 Effet de la hauteur de la cheminée (données de soufflerie)

La très bonne concordance entre les données de soufflerie et de terrain pour les essais du 21 novembre 2002 suggère que l'effet de la hauteur de la cheminée peut être correctement estimé en soufflerie pour cet emplacement de cheminée et cette direction éolienne (EC4 et θ = 160°). La figure 5.28 présente un histogramme des valeurs de k aux divers récepteurs pour des hauteurs de cheminée de 1 m à 7 m et pour M = 5,5. Comparativement à la cheminée de 1 m, la cheminée de 3 m réduit la valeur de k par un facteur aussi élevé que 2, tandis que la cheminée de 5 m réduit la valeur de k par un facteur d'environ 3 à la plupart des emplacements. Une réduction très importante de la valeur de k, par un facteur de 10 ou plus, est enfin obtenue avec la cheminée de 7 m à la plupart des échantillonneurs de toit. L'effet de la hauteur de la cheminée est moins marqué dans le cas des échantillonneurs au mur, puisque les valeurs de k sont relativement faibles, même avec la cheminée de 1 m.

5.2 Essais effectués lorsque le Faubourg se trouvait directement au vent du bâtiment BE

Nous avons effectué un total de huit essais de 50 minutes sur le terrain lorsque le Faubourg se trouvait directement au vent du bâtiment BE. Des essais ont été effectués avec la cheminée à EC3 les 12 août, 26 août et 6 septembre 2002. La cheminée se trouvait à EC4 pour les deux essais finaux du 1er octobre 2002.

Les données éoliennes ont été recueillies avec un anémomètre à hélice Young monté sur un mât de 5 m près du bord sud-ouest du toit du Faubourg. La figure 5.28 présente une vue de face du bâtiment BE et du Faubourg de même que les emplacements des cheminées (EC3 et EC4) et de l'anémomètre. Il convient de noter que le Faubourg n'est pas une structure isolée ; il est en effet relié à une longue rangée de bâtiments de 4 étages sur son flanc sud-ouest.

La figure 5.29 présente la série chronologique des vitesses éoliennes, des directions éoliennes et des intensités de turbulence pour les quatre jours d'essais. Le tableau 4.2 présente les valeurs moyennes des données éoliennes pour chaque essai de 50 minutes. Les données de vitesse éolienne à la hauteur du bâtiment BE ont été dérivées de la vitesse du vent au Faubourg ($U_{réf}$) par une estimation fondée sur une loi de puissance où $\alpha = 0{,}30$. Notez que les vents étaient de modérés à forts lors de tous les essais ($U_{réf} > 4$ m/s). Par conséquent, l'atmosphère peut être considérée comme neutre ou légèrement instable.

Les paramètres des cheminées sont présentés au tableau 4.3. Les valeurs moyennes de M pour les 8 essais de 50 minutes, fondées sur U_H, variaient entre 1,7 et 4,9. La figure 5.30 présente une photo d'un test de fumée effectué avec la cheminée de 3 m à EC3 le 6 septembre 2002.

5.2.1 Survol des données de terrain (bâtiment du Faubourg au vent)

La figure 5.32 présente la série chronologique des valeurs de k obtenues à trois échantillonneurs de toit du bâtiment BE lors des deux essais du 12 août 2002. Lors de ces essais, la cheminée de 1 m se trouvait près du bord antérieur du bâtiment (EC3), et les valeurs moyennes de M étaient de 2,4 et 4,9. La figure 5.32a montre que, près de la cheminée (échantillonneur R4), l'augmentation de M fait décroître k. Bien qu'une fluctuation importante de k ait été constatée lors des deux essais, la valeur maximale de k obtenue pour M = 2,3 (k = 2 900) était considérablement plus élevée que celle obtenue pour M = 4,9 (k = 900). Par contre, M n'a eu que peu d'effet sur les valeurs de k obtenues plus loin de la cheminée, comme le montrent les figures 5.32b et 5.32c pour les échantillonneurs du centre du toit (R23) et de l'édicule nord-est (P2), respectivement. À ces deux emplacements, les valeurs moyennes de k étaient similaires pour les deux valeurs de M.

La série chronologique des concentrations obtenues à trois échantillonneurs au mur situés près du toit du Faubourg lors des essais du 26 août 2002 est présentée à la figure 5.33a et à la figure 5.33b pour M = 1,7 et M = 3,9, respectivement. Notez que, dans les deux cas, une très forte corrélation entre les échantillonneurs est évidente. On peut en déduire que, pour les sources d'émission dans le voisinage immédiat du sillage du bâtiment, l'emplacement ou la taille d'une prise d'air neuf au mur sous le vent a peu d'influence sur la quantité d'effluent entraîné.

L'effet de M sur les concentrations au mur est relativement faible dans ce cas précis. Les valeurs moyennes de k sur 50 minutes à l'échantillonneur du centre du toit (FB2) étaient de 394 pour M = 1,7 et de 277 pour M = 3,9. Ainsi, une augmentation de M par un facteur de plus de 2 n'a eu pour effet de réduire k que de 40 %.

5.2.2 Comparaison des valeurs de k aux données de soufflerie

La figure 5.34 montre l'influence de la direction du vent sur les valeurs de k obtenues sur le terrain à intervalles de 5 minutes à l'échantillonneur situé au centre du mur du Faubourg avec la cheminée à EC3 et un M peut élevé ($2 < M < 3$). Les figures 5.34a et 5.34b présentent les résultats obtenus avec les cheminées de 1 m et 3 m, respectivement. Les résultats obtenus sur le terrain ne révèlent aucune tendance marquée à l'intérieur de la fourchette $200° < \theta < 235°$, bien que les données présentent une dispersion importante. De même, la valeur de k en soufflerie est relativement constante par rapport à la direction du vent, bien qu'elle atteigne son maximum à $\theta = 220°$ avec la cheminée de 1 m et qu'elle affiche une légère hausse par rapport à θ avec la cheminée de 3 m.

La figure 5.34 montre bien que la soufflerie a surestimé k sur le bâtiment du Faubourg, en moyenne par un facteur de 2 à 3. On peut en déduire que la soufflerie n'a pas modélisé l'élévation du panache de façon satisfaisante. Cela dit, certains facteurs peuvent avoir affecté les résultats obtenus en soufflerie, notamment les faibles valeurs d'intensité de la turbulence (I.T. = σ_u/U) et l'échelle importante de la maquette (L_x/D). À titre d'exemple, l'I.T. en soufflerie était d'environ 13 % à la hauteur de l'anémomètre du Faubourg, comparativement aux valeurs de 25 % à 30 % observées lors des essais sur le terrain. La turbulence relativement faible dans la soufflerie peut en outre avoir réduit l'étalement latéral du panache, et ainsi avoir fait grimper les valeurs de k au mur du bâtiment du Faubourg.

La figure 5.35 montre l'influence de la direction du vent sur les concentrations de terrain et de soufflerie mesurées à un échantillonneur de l'édicule (P2) avec une cheminée de 1 m et de 3 m à EC3. Les résultats obtenus sur le terrain révèlent une influence négligeable de θ à l'intérieur de la

fourchette $200° < \theta < 235°$ pour la cheminée de 1 m, et de la fourchette $215° < \theta < 235°$ pour la cheminée de 3 m. Par contre, les valeurs de k obtenues en soufflerie accusent une certaine dépendance à l'égard de θ, k ayant dans les deux cas atteint un sommet à $\theta = 220°$. Les valeurs de k obtenues en soufflerie sur l'édicule du bâtiment BE sont plus élevées que la valeur moyenne de terrain par un facteur d'environ 2, bien que, dans certains cas, les données de soufflerie soient inférieures aux valeurs de terrain pour $h_s = 1$ m.

La figure 5.36a présente les distributions de k, en soufflerie et sur le terrain (moyenne sur 50 minutes), sur le toit du bâtiment BE et au mur sous le vent du Faubourg lors du 1er essai effectué le 12 août 2002 avec la cheminée de 1 m à EC3. La vitesse d'évacuation de 18 m/s^{-1} a donné une valeur de M relativement élevée de 4,9. Les données de soufflerie obtenues sur le toit du bâtiment BE étaient généralement comparables aux valeurs de terrain, sauf près de la cheminée, où les valeurs de k sur le terrain étaient considérablement plus élevées. Par exemple, à l'emplacement 2, plus près de la cheminée, la valeur de terrain était environ 4 fois plus élevée que la valeur de soufflerie. Notez cependant que cette tendance est renversée dans le cas des récepteurs au mur sous le vent du Faubourg, où les valeurs de k obtenues en soufflerie sont considérablement plus élevées que les données de terrain, tel qu'illustré à la figure 5.34. Les distributions au mur sous le vent sont discutées plus en détail ci-dessous.

La figure 5.36b présente les distributions de k en soufflerie et sur le terrain avec un faible M ($M \sim 2,3$). Comparativement au cas de M élevé présenté à la figure 5.35a, les concentrations obtenues avec un faible M sont plus élevées à tous les échantillonneurs. Près de la cheminée, les valeurs de k obtenues sur le terrain sont beaucoup plus élevées que les valeurs de soufflerie.

La figure 5.37 montre la variation de k sur le toit du bâtiment BE dans la direction au vent lors des essais du 12 août 2002. Près de la cheminée, les valeurs de terrain sont considérablement plus élevées que les valeurs de soufflerie. Plus particulièrement dans le cas où M était faible ($M_{terrain} = 2,3$), la valeur de k obtenue sur le terrain est presque 10 fois plus élevée que la valeur de soufflerie. Cet écart peut être dû à une modélisation insatisfaisante des émissions de la cheminée de la maquette. Dans ce cas précis, le débit d'évacuation était laminaire, de sorte que l'élévation du panache pourrait avoir été trop importante dans la soufflerie.

Dans le cas où M ~ 5, on s'attendrait à ce que l'élévation du panache de la maquette soit plus précisément simulée, puisque le débit d'évacuation était turbulent. Et pourtant, la valeur de k obtenue sur le terrain a dépassé la valeur de soufflerie par un facteur de 4 à l'échantillonneur situé près de la cheminée. Il convient de noter qu'une concordance appréciable entre les données de soufflerie et de terrain est évidente plus loin de la cheminée.

La figure 5.38 montre la variation de k par rapport à x pour l'essai du 1er octobre 2002 lorsque la cheminée se trouvait près du centre du toit (x/L = 0,43) et que la hauteur de la cheminée était de 1 m. Dans ce cas précis, les valeurs de terrain près de la cheminée étaient environ deux fois plus élevées que celles des valeurs de soufflerie. Ces écarts peuvent une fois de plus s'expliquer par l'élévation excessive du panache en soufflerie. Quoi qu'il en soit, une concordance beaucoup plus marquée entre les valeurs de terrain et de soufflerie a été obtenue aux emplacements près des bords au vent et sous le vent du bâtiment, de même que pour les valeurs plus élevées de M.

Les figures 5.37 et 5.38 montrent que les valeurs les plus faibles de k sur le toit du bâtiment BE ont été enregistrées près du bord sous le vent du bâtiment. On peut en déduire que, pour cette

configuration de bâtiment, l'emplacement optimal des prises d'air se trouve être le mur nord-est du bâtiment.

La figure 5.39 présente les distributions verticales de k au mur sous le vent du Faubourg lors de l'essai du 26 août 2002 (2^{e} heure). Dans ce cas précis, la cheminée se trouvait près du bord au vent du bâtiment (x/L = 0,08), et la hauteur de la cheminée était de 3 m. Le facteur d'impulsion était relativement important (M = 3,9). Les valeurs de k obtenues au mur du bâtiment du Faubourg en soufflerie étaient considérablement plus élevées que les valeurs de terrain, sauf près du toit du bâtiment émetteur. Près du toit du Faubourg, les valeurs de k obtenues en soufflerie sont environ 2 à 3 fois plus élevées que les valeurs de terrain.

La figure 5.40 présente des résultats similaires pour l'essai du 1er octobre 2002 (2^{e} heure), où x/L = 0,43, h_s = 1 m et M = 3,7. Comme pour l'essai du 26 août 2002, la valeur maximale de k a été enregistrée près du toit du Faubourg, et les valeurs de soufflerie sont deux à trois fois plus élevées que les valeurs de terrain. Cependant, ces valeurs sont inférieures à celles obtenues avec la cheminée au vent utilisée lors de l'essai du 26 août 2002. Par exemple, la valeur maximale de k obtenue en soufflerie avec la cheminée centrale (k = 370) était 2 à 3 fois moindre que les valeurs obtenues avec la cheminée au vent (750 < k < 1 050)

Des expériences en soufflerie ont été effectuées pour évaluer l'effet de la hauteur de la cheminée sur k lorsque que le Faubourg était au vent du bâtiment BE. La figure 5.41 présente les résultats obtenus à trois échantillonneurs de toit du bâtiment BE et aux échantillonneurs au mur du Faubourg avec la cheminée à EC3 et M = 2,2. Les résultats obtenus sur les deux bâtiments révèlent que même une cheminée de 7 m ne réduit k que de peu. Tout au plus, la cheminée de

7 m a en effet réduit k par un facteur de 2 par rapport à la valeur obtenue avec la cheminée de 1 m. Des réductions plus importantes pourraient cependant être obtenues avec un M plus élevé.

Écarts entre les concentrations obtenues en soufflerie et sur le terrain

Les valeurs de k en soufflerie au mur sous le vent du Faubourg étaient systématiquement plus élevées que sur le terrain, quels que soient la valeur de M et le nombre de Reynolds de la cheminée modélisée. Cela indique que la soufflerie n'a pas simulé de façon satisfaisante la proximité du sillage du Faubourg. L'intensité de la turbulence sur le toit du Faubourg mesurée en soufflerie était en effet inférieure à 50 % de la valeur type sur le terrain (voir tableau 4.4b), de sorte que les paramètres d'écoulement des sillages modélisés et en grandeur réelle peuvent différer. De plus, l'absence de turbulence à grande échelle dans la soufflerie pourrait avoir réduit le déplacement latéral du panache.

Les figures 5.42a et 5.42b présentent les diagrammes de dispersion des valeurs de k mesurées sur le toit du bâtiment BE et au mur du Faubourg, en soufflerie et sur le terrain, pour les essais effectués lorsque le Faubourg était au vent. Les données recueillies sur le toit du bâtiment BE sont généralement fidèles, la majorité des valeurs de soufflerie se situant à un facteur inférieur à deux des valeurs de terrain. Tel qu'expliqué précédemment, la soufflerie a sous-estimé les valeurs de terrain aux abords de la cheminée. La figure 5.42b révèle que la soufflerie a constamment surestimé les valeurs de k mesurées au mur du Faubourg.

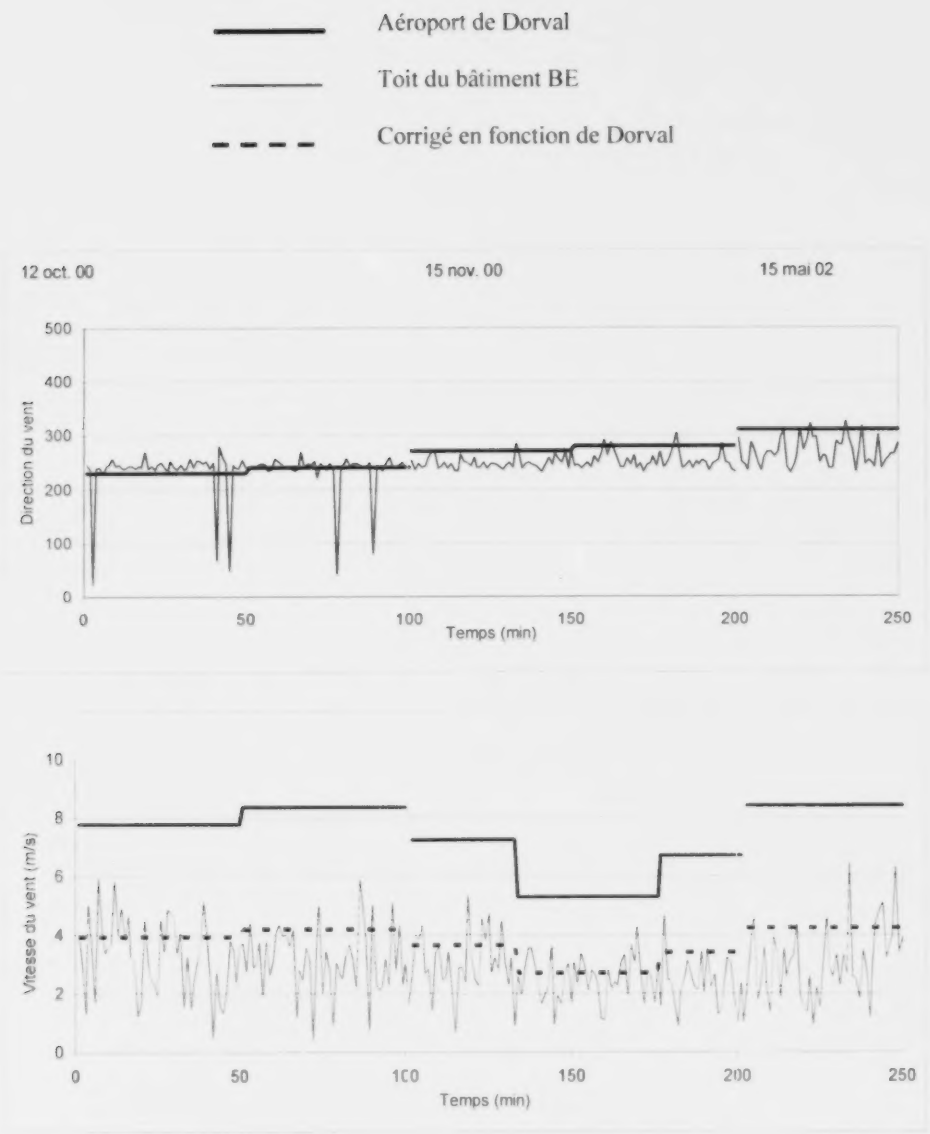


Figure 5.1 Données éoliennes obtenues à l'emplacement de cheminée 1.

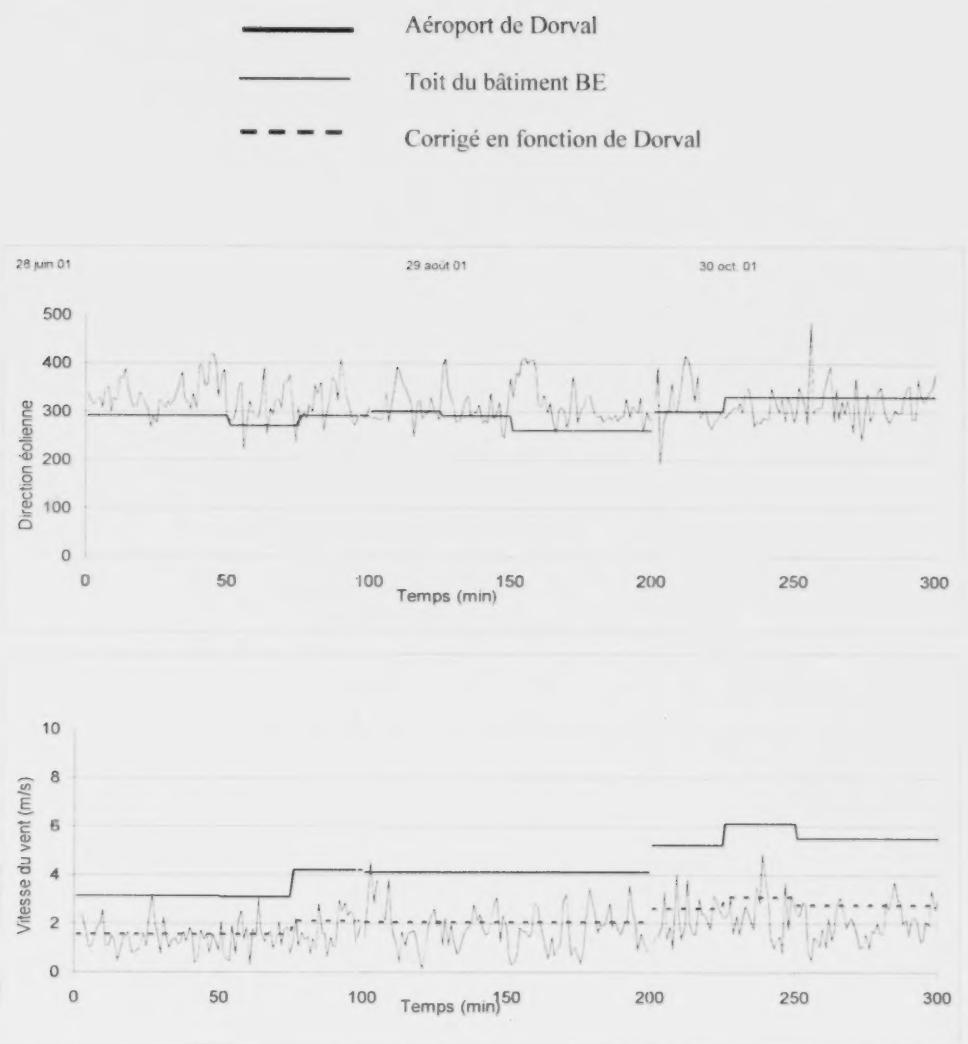


Figure 5.2 Données éoliennes obtenues à l'emplacement de cheminée 2.

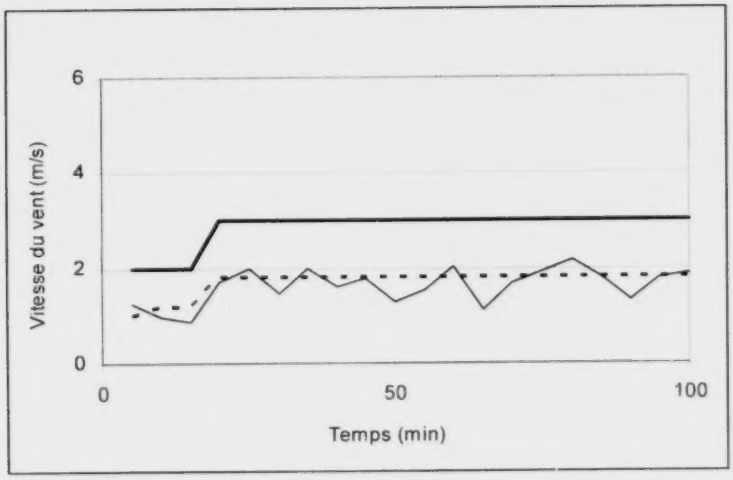


Figure 5.3 Données éoliennes obtenues à l'emplacement de cheminée 4 (essai sur le terrain du 21 nov. 02).

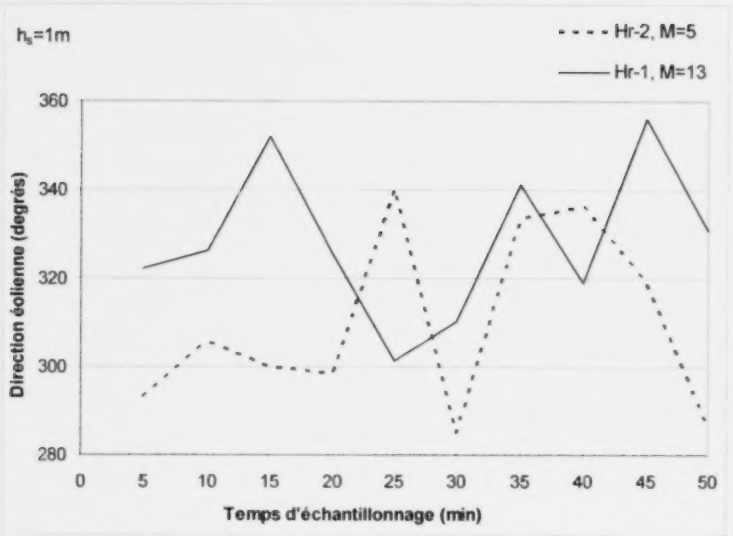
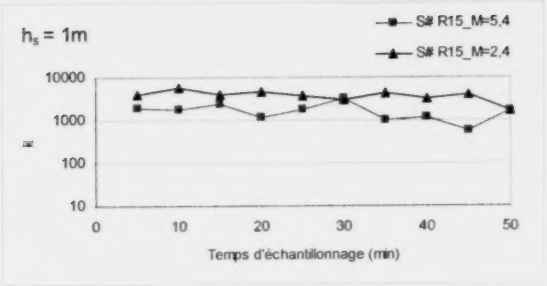
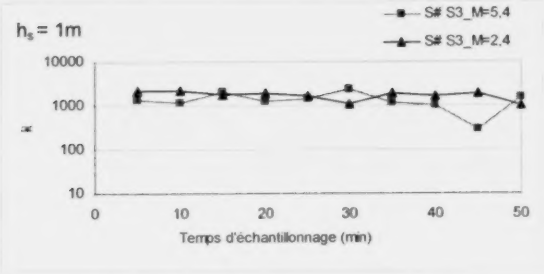


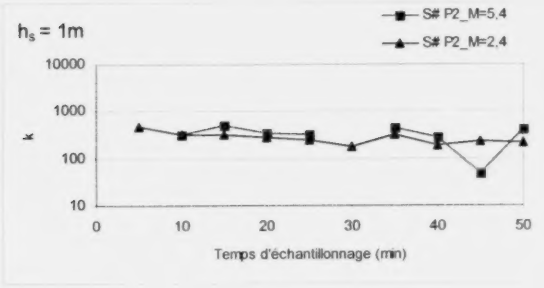
Figure 5.4 Variation de la direction éolienne en fonction du temps pour l'essai sur le terrain du 28 juin 01 : emplacement de cheminée 2.



(a)



(b)



(c)

Figure 5.5 Série chronologique des concentrations k pour les essais sur le terrain du 12 oct. 00 aux échantillonneurs près (a), à mi-chemin (b) et éloignés de la cheminée (c) : emplacement de cheminée 1.

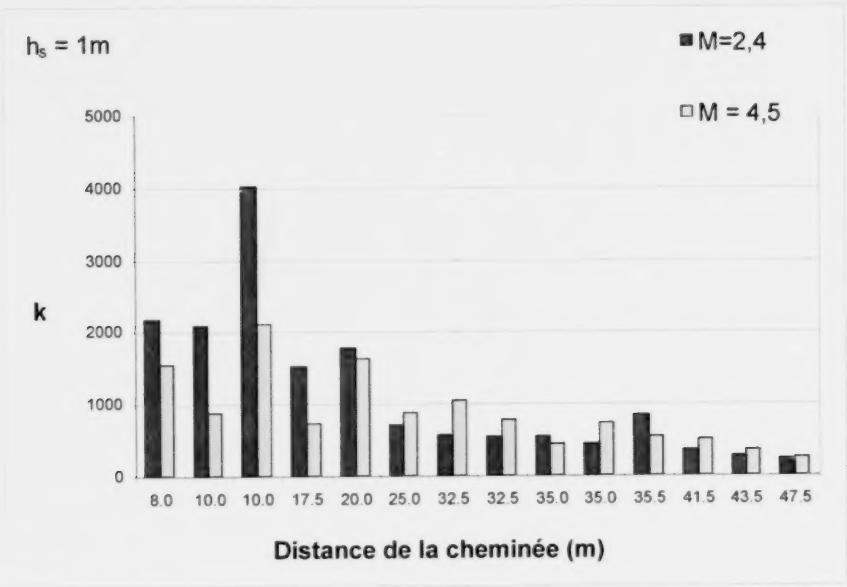


Figure 5.6 Effet du facteur d'impulsion (M) sur k : essai sur le terrain du 12 oct. 00 : emplacement de cheminée 1.

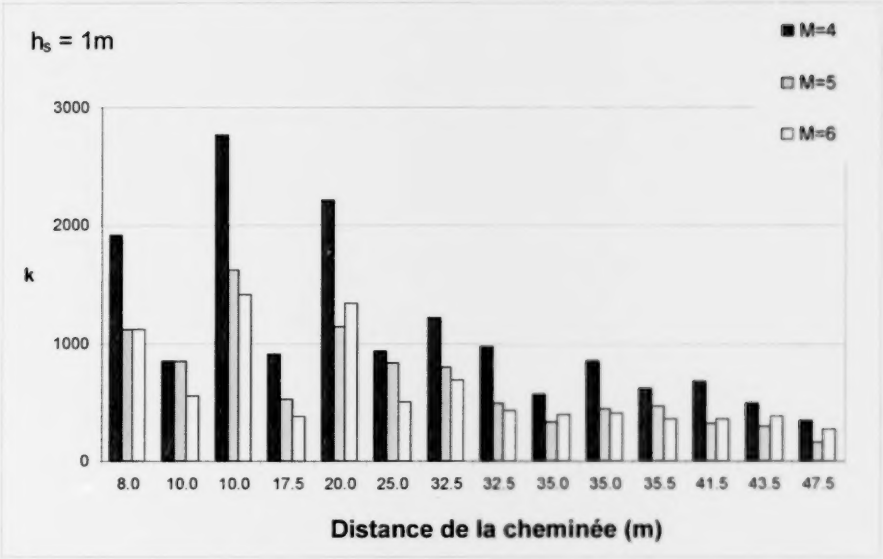


Figure 5.7 Effet du facteur d'impulsion (M) sur k : essai sur le terrain du 12 oct. 00 : emplacement de cheminée 1.

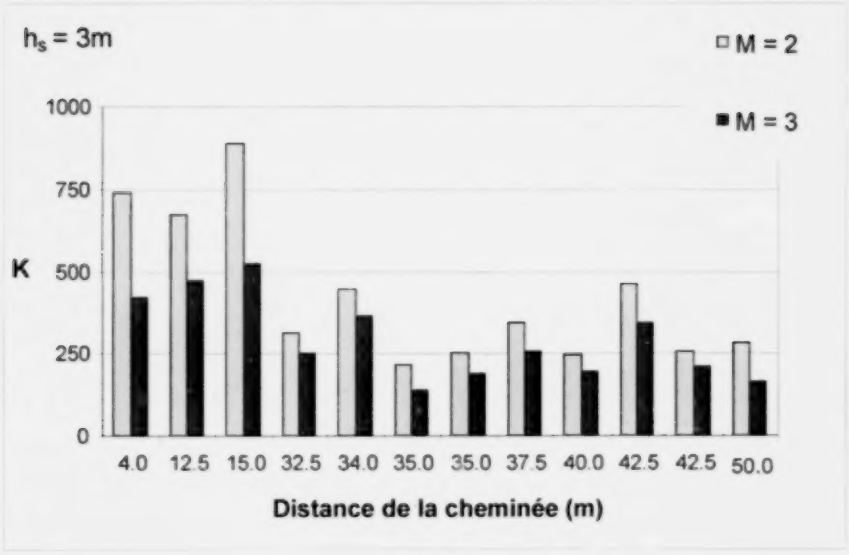


Figure 5.8 Effet du facteur d'impulsion (M) sur k : essai sur le terrain du 15 mai 02 : emplacement de cheminée 1.

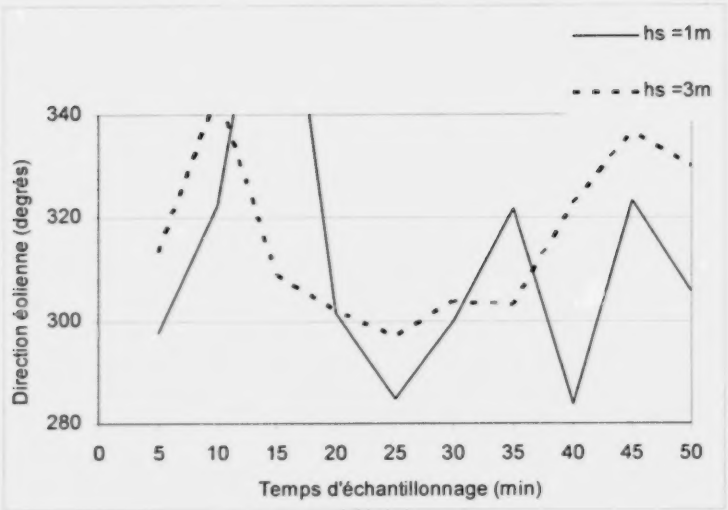


Figure 5.9 Variation de la direction éolienne en fonction du temps pour l'essai sur le terrain du 30 oct. 01 : emplacement de cheminée 2.

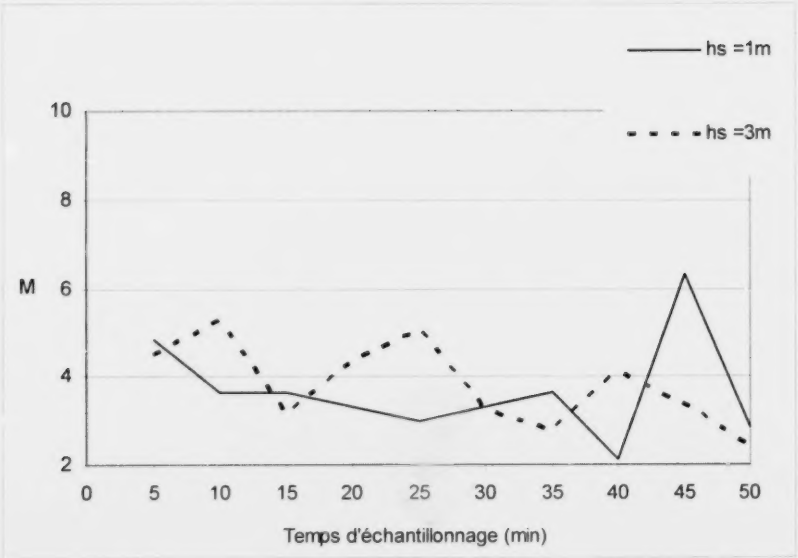


Figure 5.10 Variation du facteur d'impulsion (M) en fonction du temps pour l'essai sur le terrain du 30 oct. 01 : emplacement de cheminée 2.

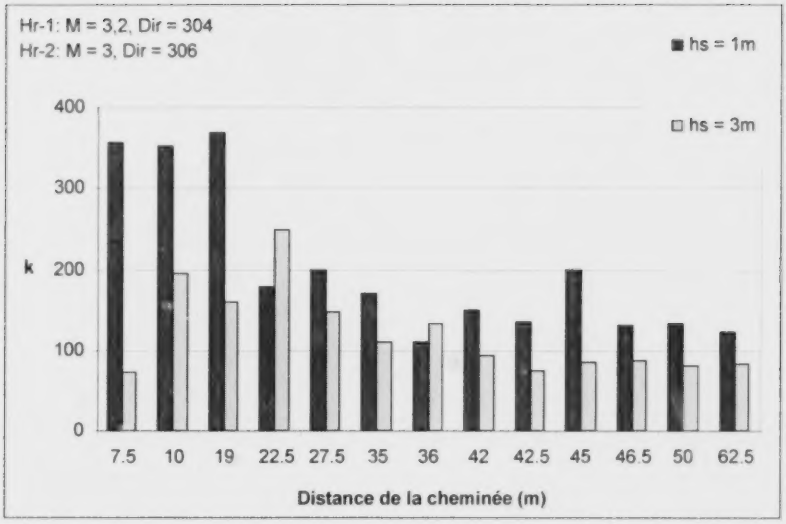


Figure 5.11 Effet de la hauteur de la cheminée sur k pour l'essai sur le terrain du 30 oct. 01 : emplacement de cheminée 2.

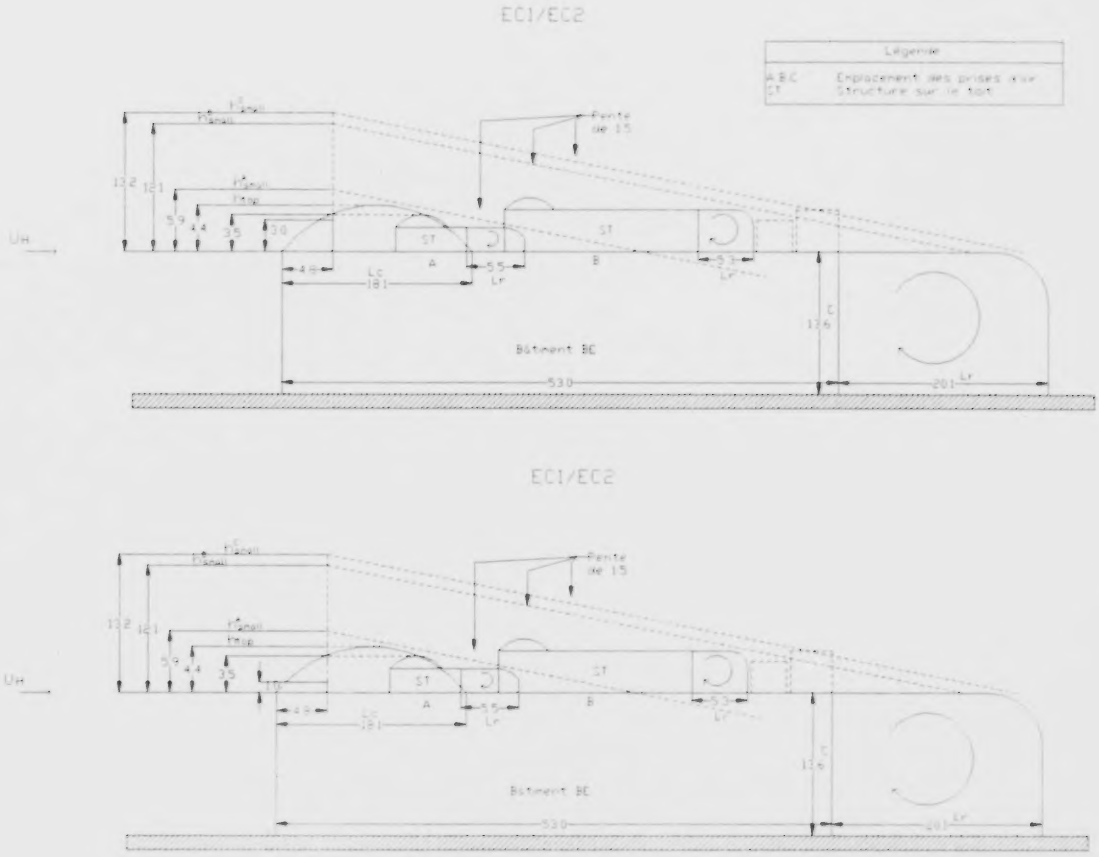


Figure 5.12 Méthode de conception géométrique de l'ASHRAE pour les emplacements de cheminée 1 et 2 : hauteurs de cheminée de 3 m et de 1 m.

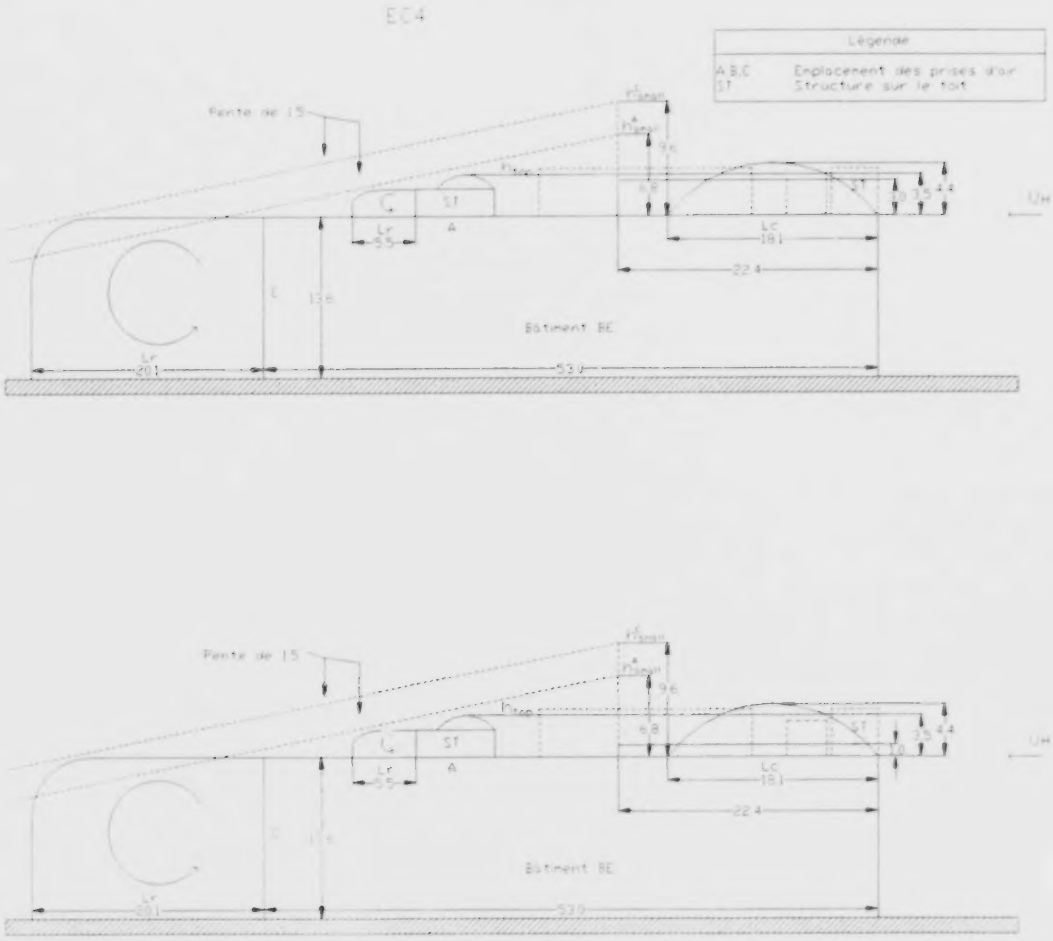


Figure 5.13 Méthode de conception géométrique de l'ASHRAE pour l'emplacement de cheminée 4 : hauteurs de cheminée de 3 m et de 1 m.

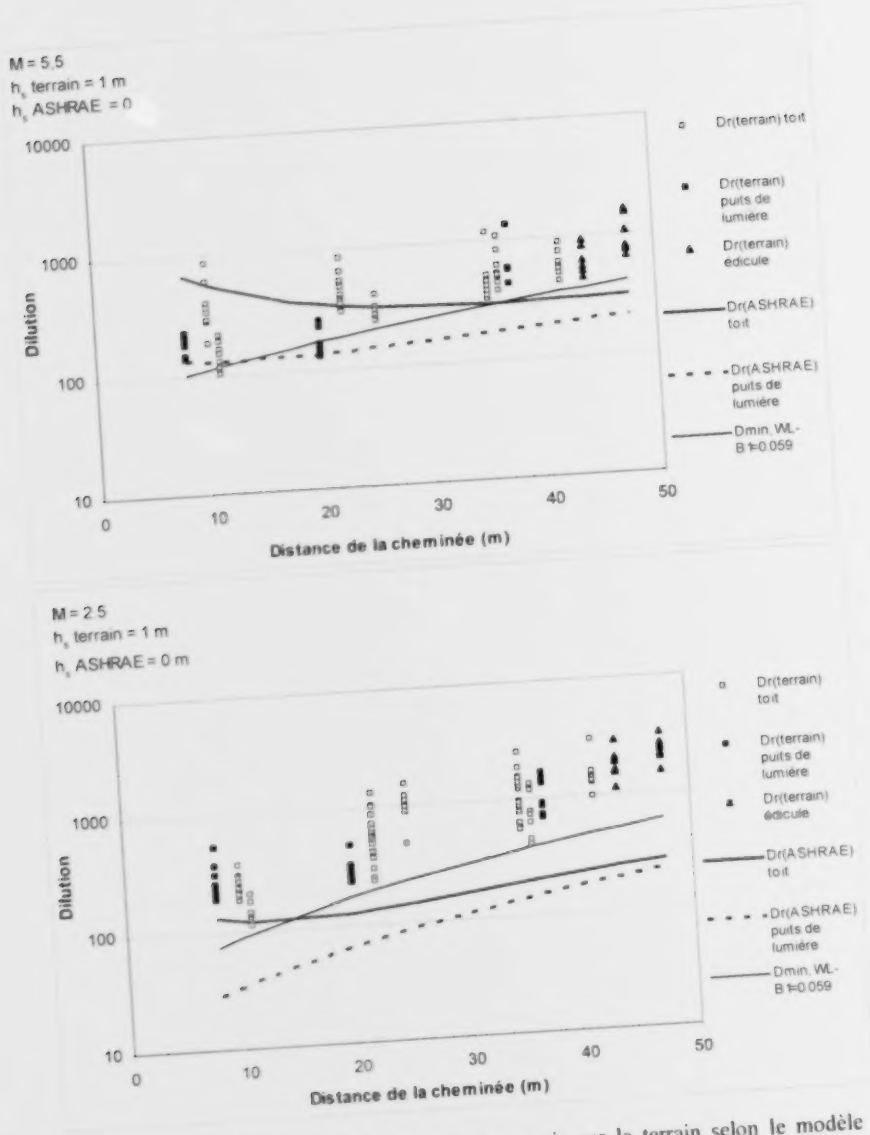


Figure 5.14 Comparaison des données de dilution des essais sur le terrain selon le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) et le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) : 12 oct. 00 : essais des heures 1 et 2.

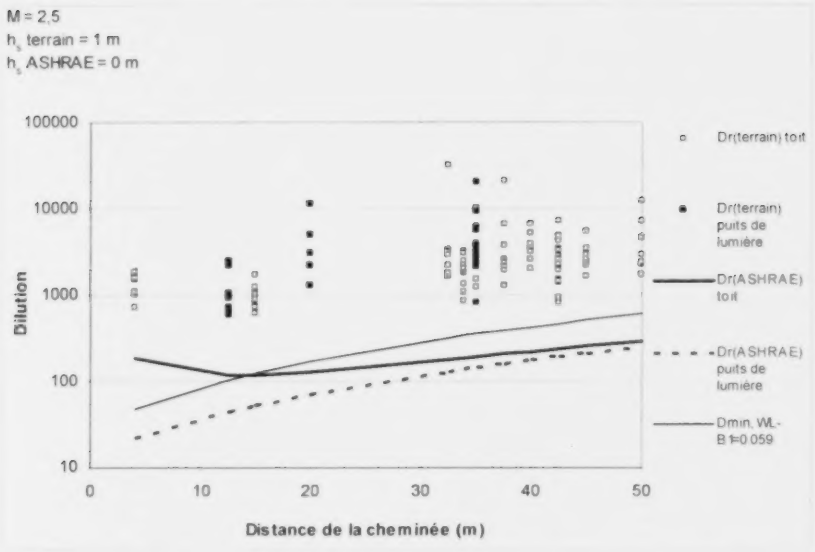


Figure 5.15 Comparaison des données de dilution des essais sur le terrain selon le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) et le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) : essai du 15 mai 02.

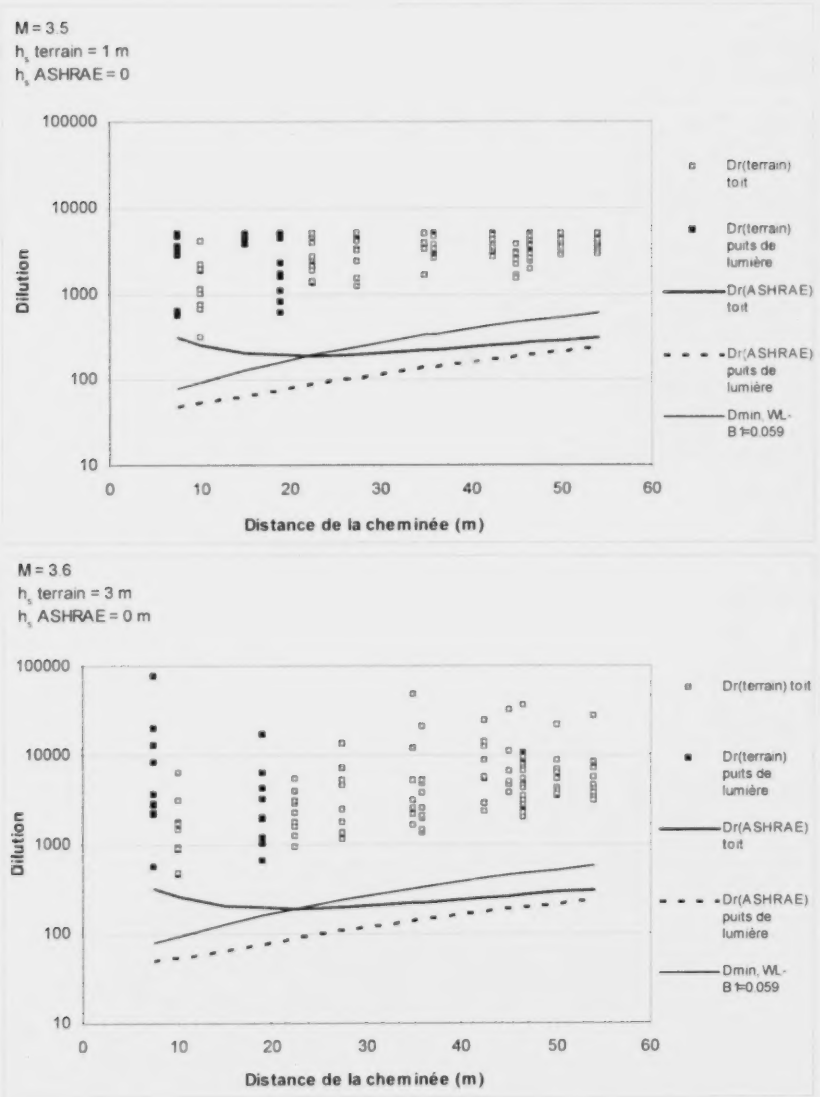
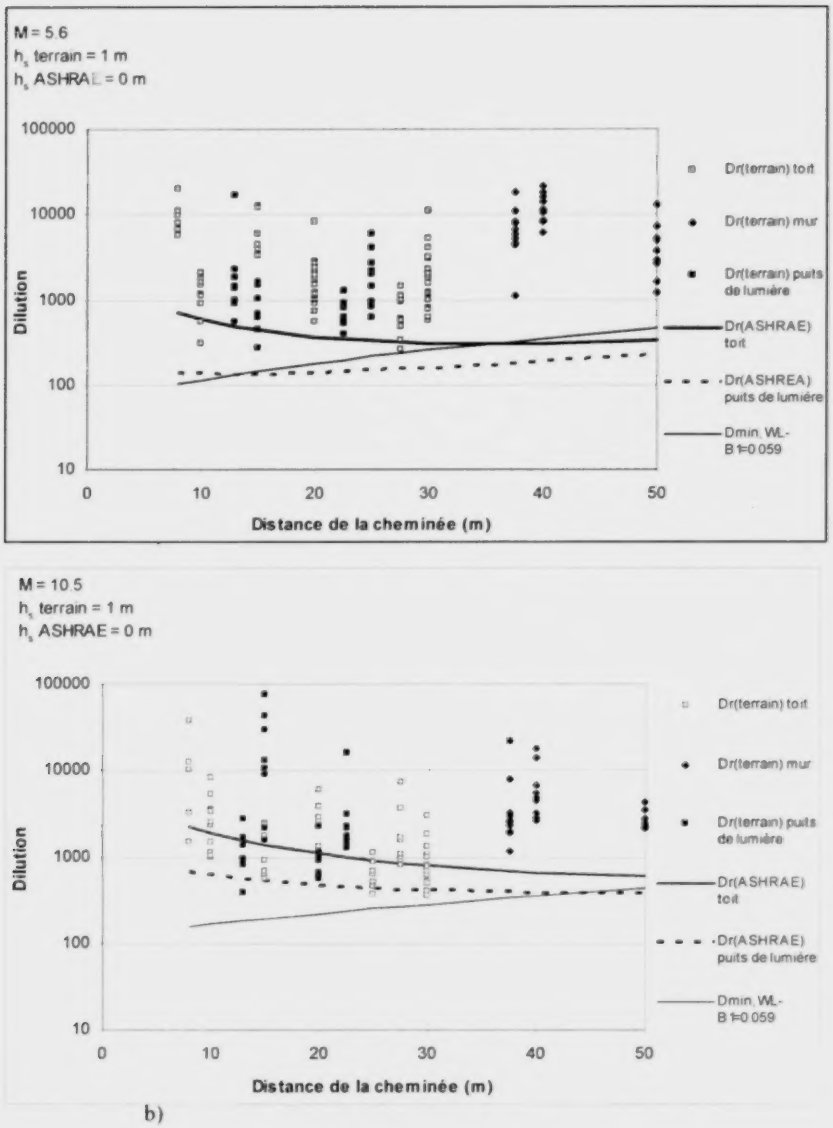


Figure 5.16 Comparaison des données de dilution des essais sur le terrain selon le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) et le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) : 30 oct. 01 : essais des heures 1 et 2.



b)

Figure 5.17 Comparaison des données de dilution des essais sur le terrain selon le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) et le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) : 21 nov. 02 : essais des heures 1 et 2.

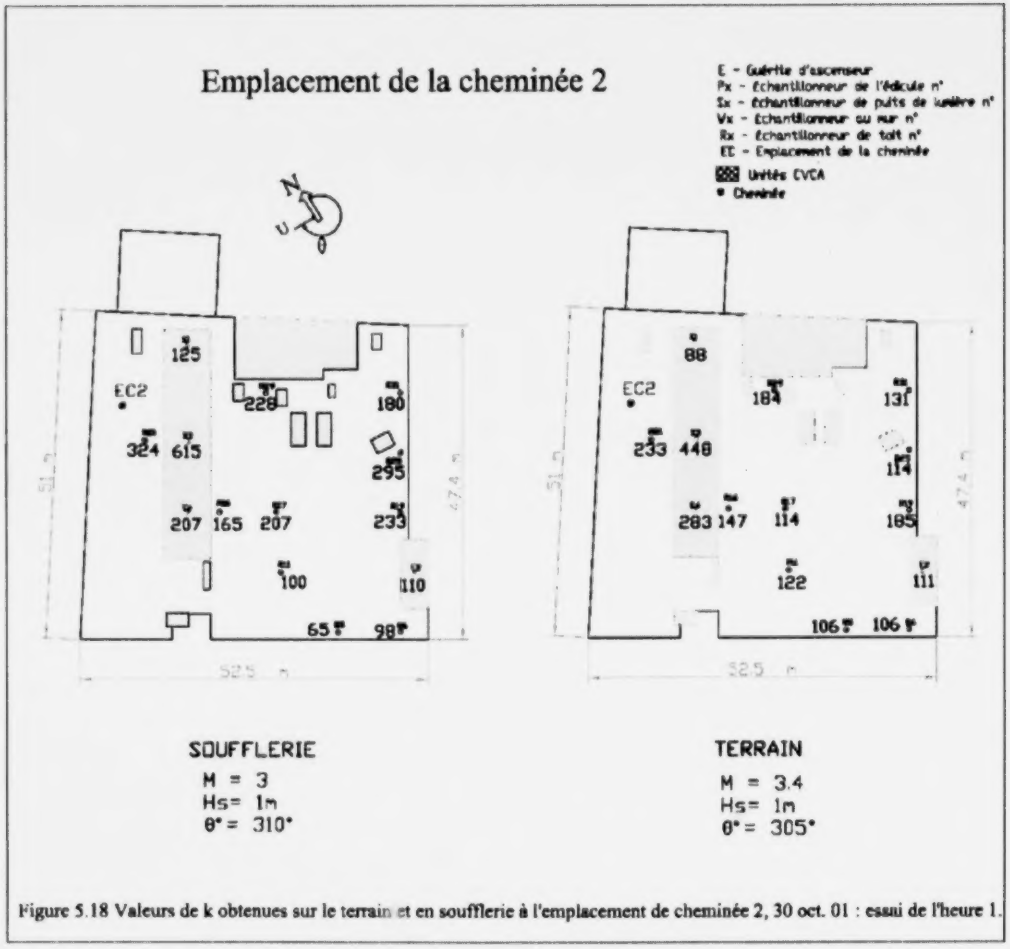


Figure 5.18 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 30 oct. 01 : essai de l'heure 1.

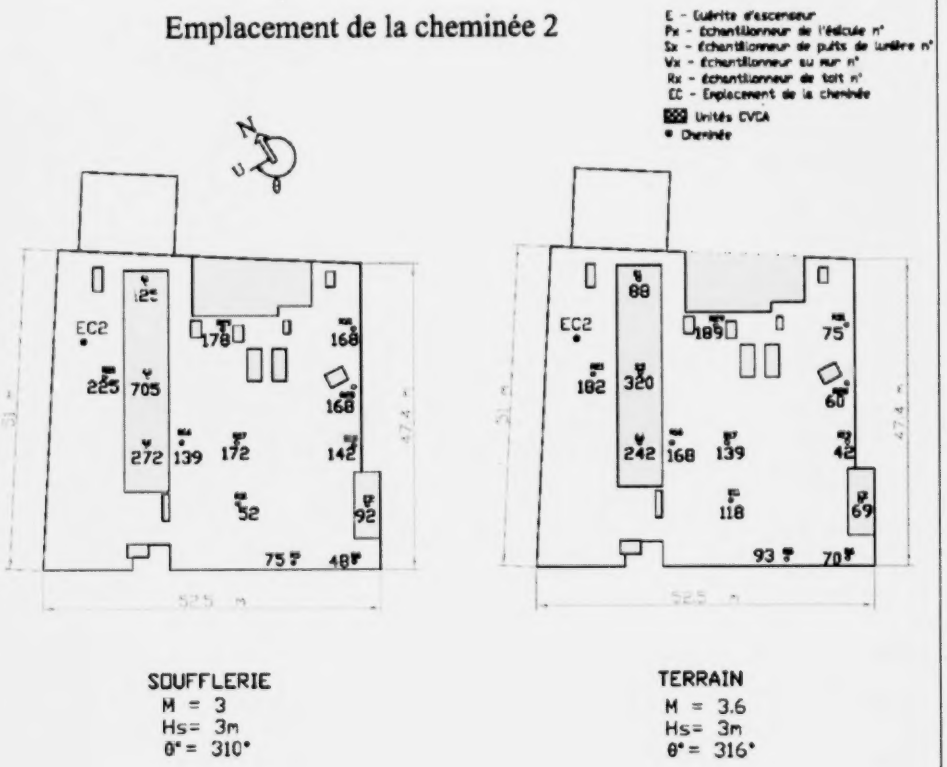
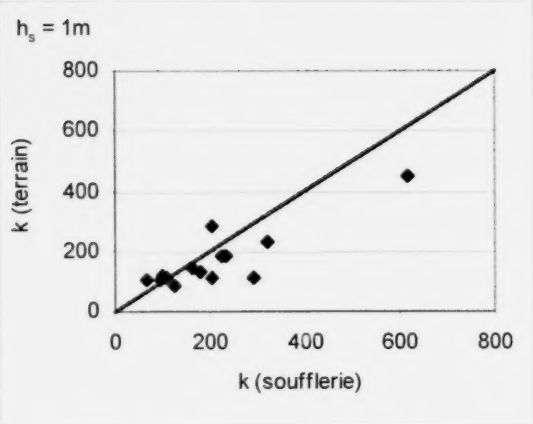


Figure 5.19 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 30 oct. 01 : essai de l'heure 2.



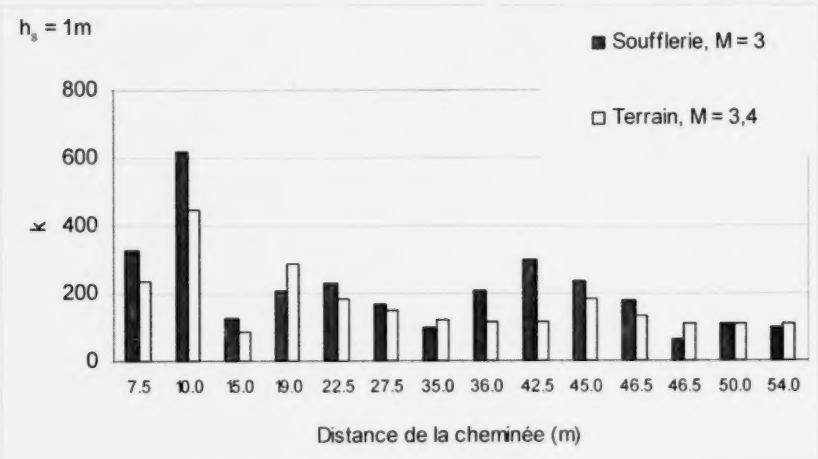
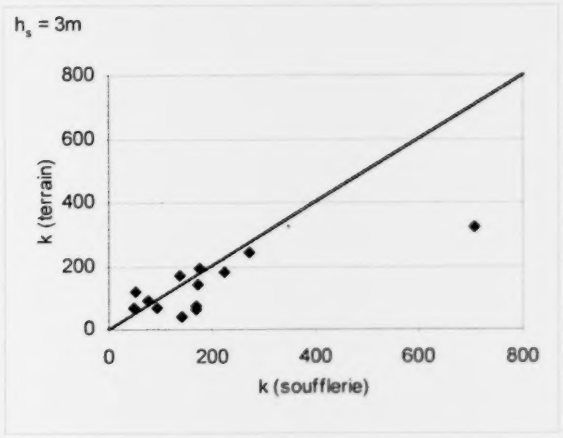


Figure 5.20 Données de soufflerie et de terrain – Diagramme de dispersion et histogramme des concentrations : essai de l'heure 1 du 30 oct. 01 : emplacement de cheminée 2.



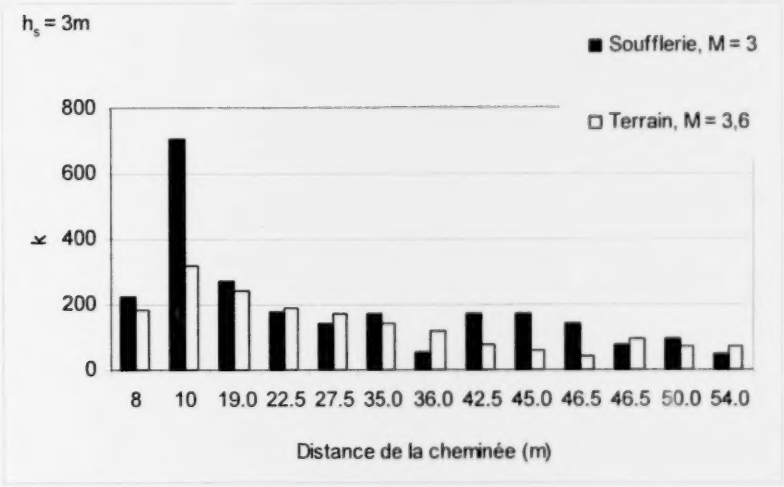


Figure 5.21 Données de soufflerie et de terrain – Diagramme de dispersion et histogramme des concentrations : essai de l'heure 2 du 30 oct. 01 : emplacement de cheminée 2.

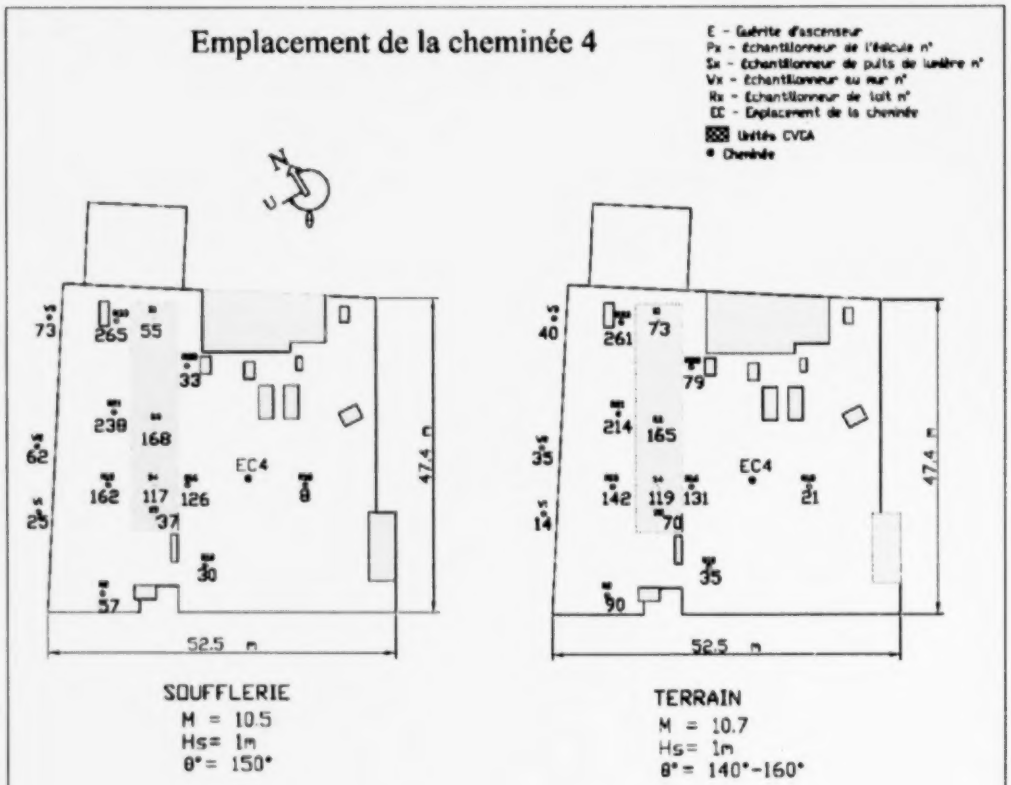
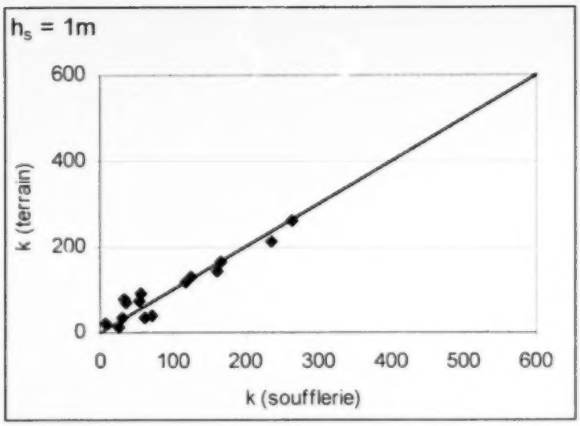


Figure 5.22 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 4, 21 nov. 02 essai de l'heure 2.



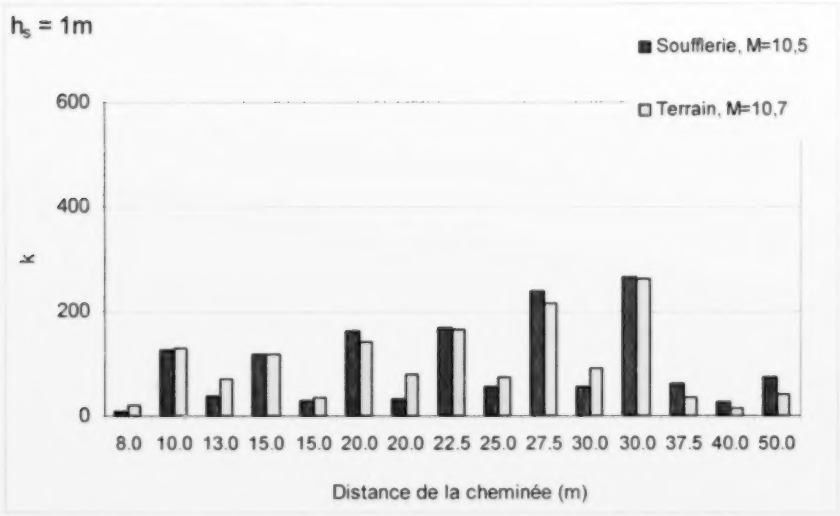


Figure 5.23 Données de soufflerie et de terrain – Diagramme de dispersion et histogramme des concentrations : essai de l'heure 2 du 21 nov. 02 : emplacement de cheminée 4.

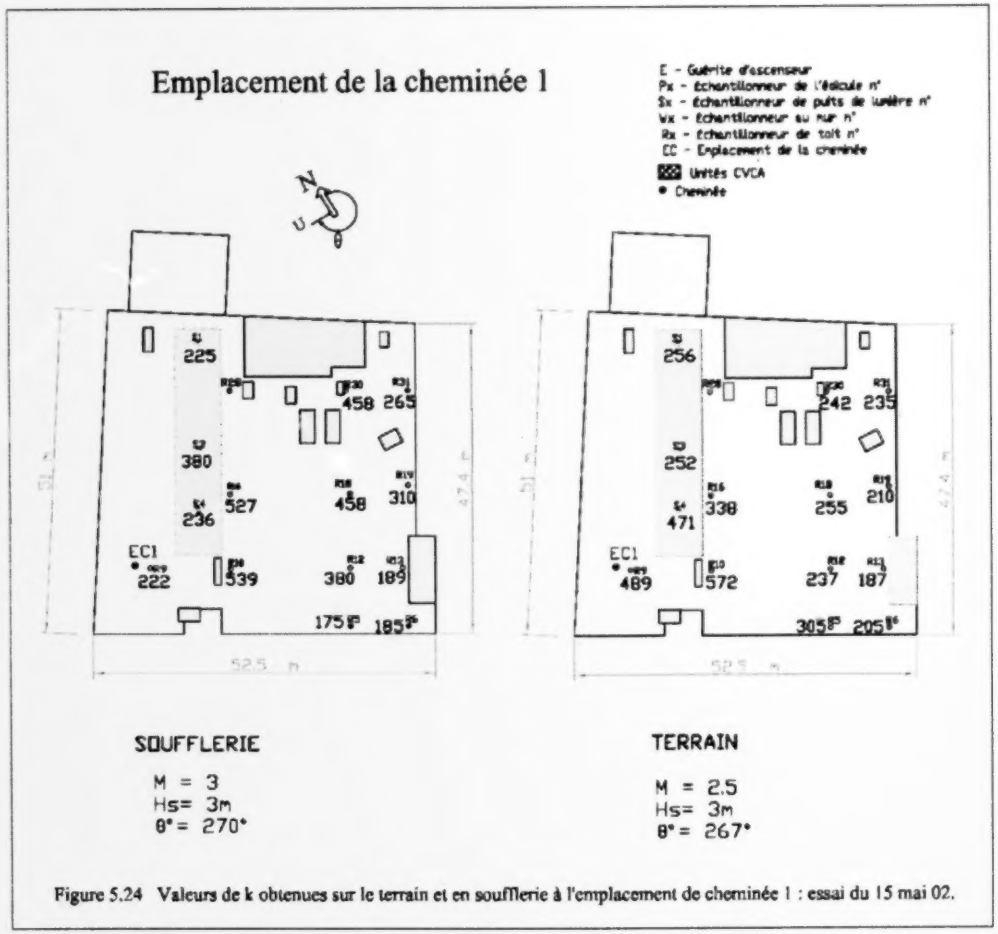


Figure 5.24 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 1 : essai du 15 mai 02.

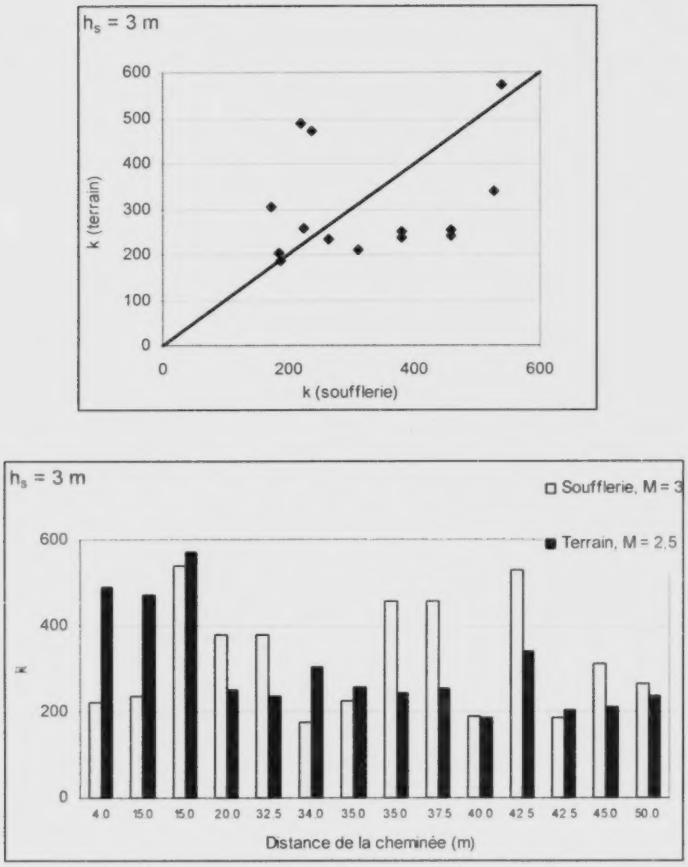


Figure 5.25 Données de soufflerie et de terrain – Diagramme de dispersion et histogramme des concentrations : essai du 15 mai 02 : emplacement de cheminée 1.

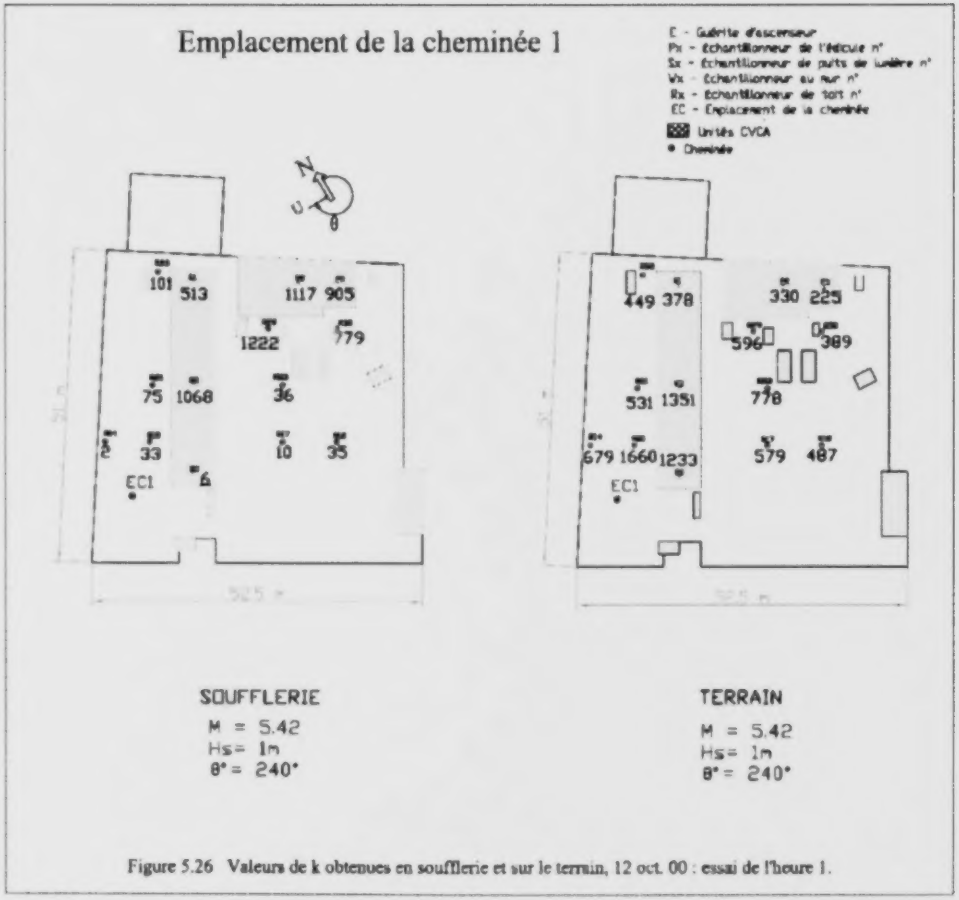
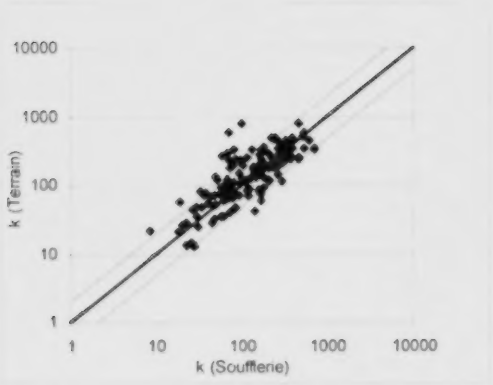
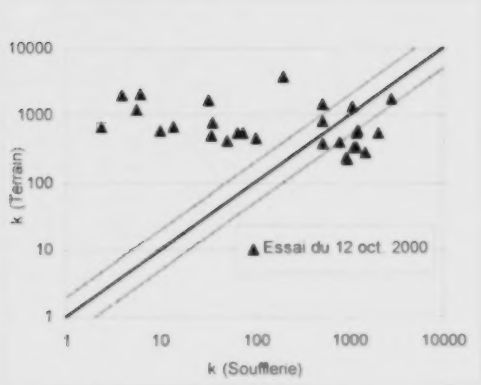


Figure 5.26 Valeurs de k obtenues en soufflerie et sur le terrain, 12 oct. 00 : essai de l'heure 1.



a)Tous les essais sauf celui du 12 oct. 2000



b) Essai du 12 oct. 2000 (2 heures)

Figure 5.27 Diagrammes de dispersion des données de k obtenues en soufflerie et sur le terrain en présence d'un terrain en amont dégagé.

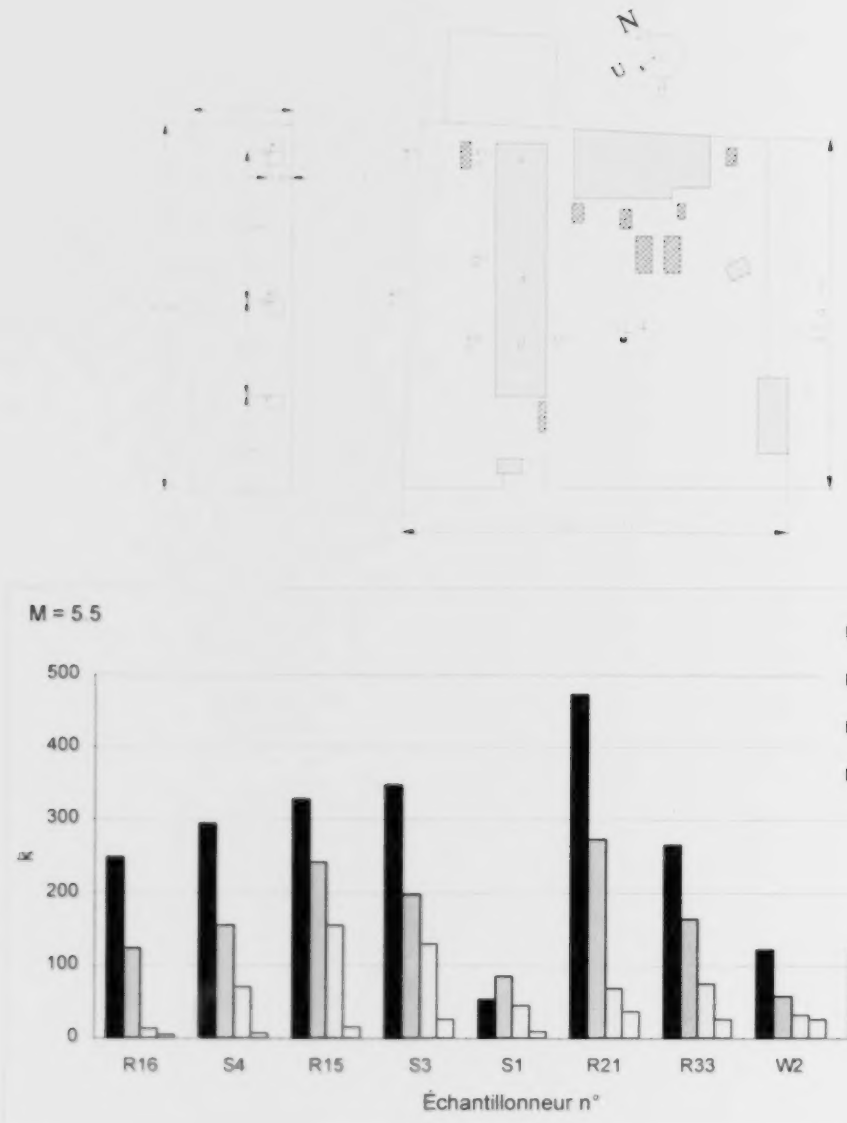


Figure 5.28 Histogramme illustrant l'effet de la hauteur de la cheminée sur k : emplacement de cheminée 4, direction éolienne = 150°.

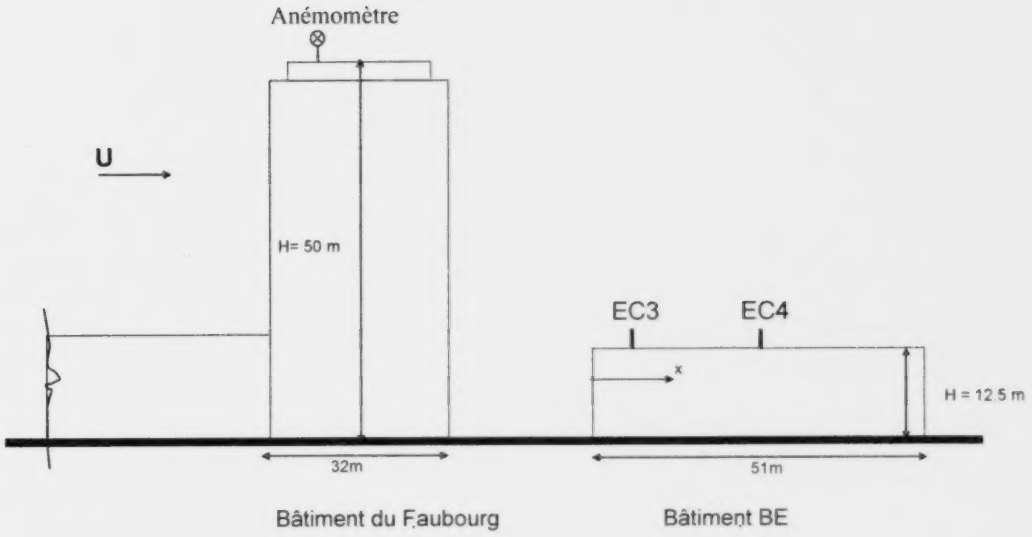


Figure 5.29 Vue de face du bâtiment BE et du Faubourg.

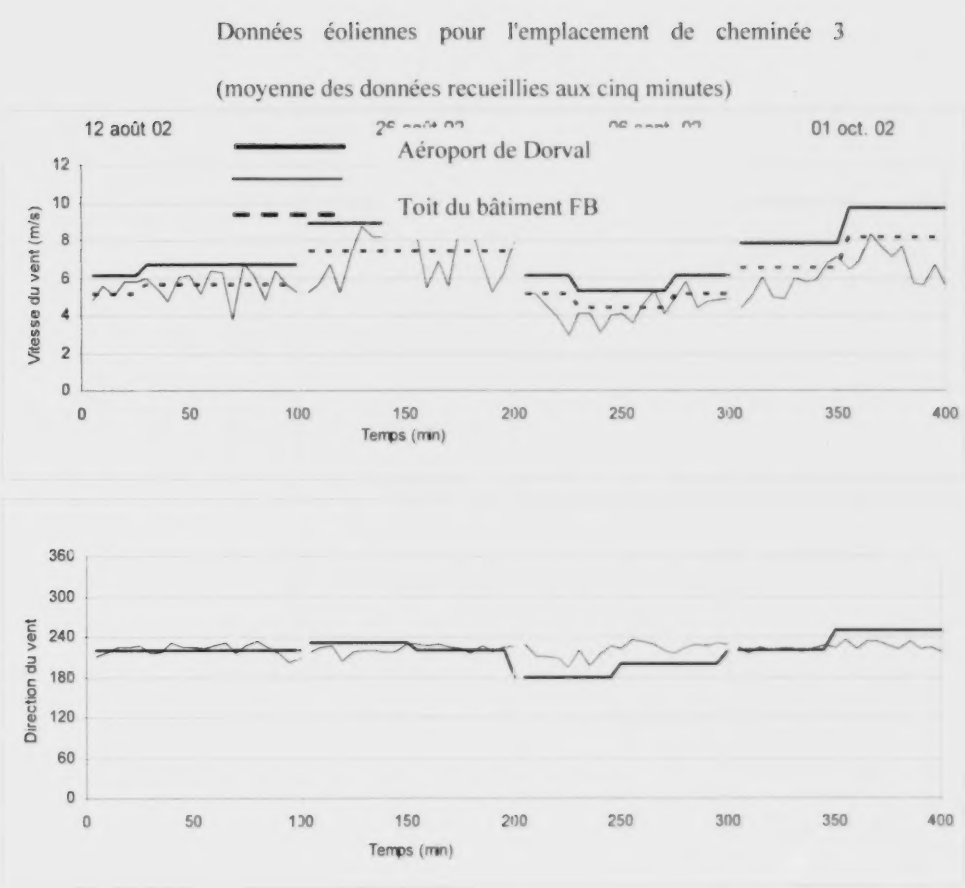
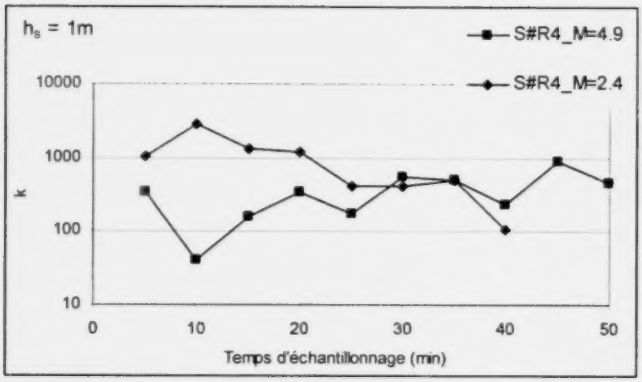
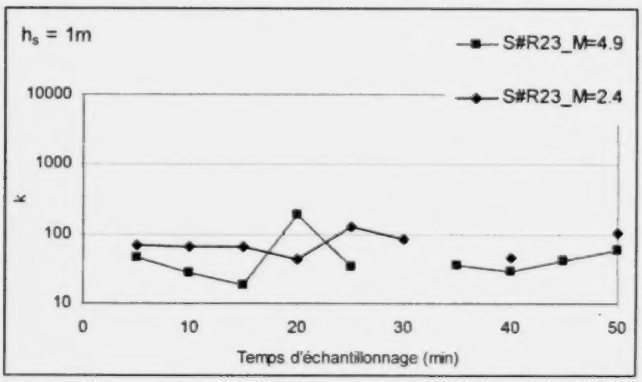


Figure 5.30 Données éoliennes de terrain obtenues sur le toit du Faubourg (le bâtiment BE étant dans son sillage).

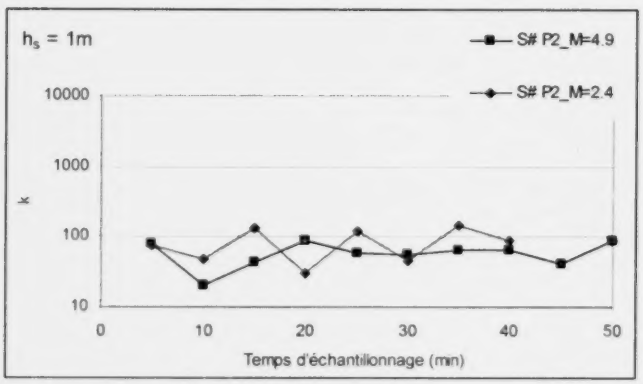
Figure 5.31 Test de fumée pour l'essai sur le terrain de l'heure 2 du 06 sept. 02 : emplacement de cheminée 3.



a) près de la cheminée

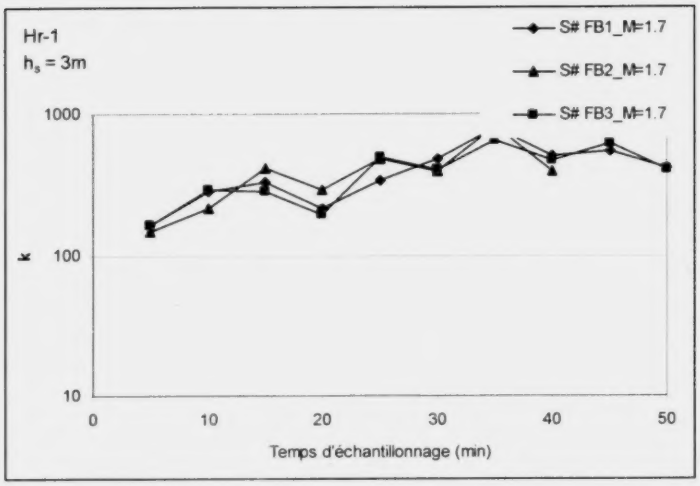


b) à mi-chemin de la cheminée

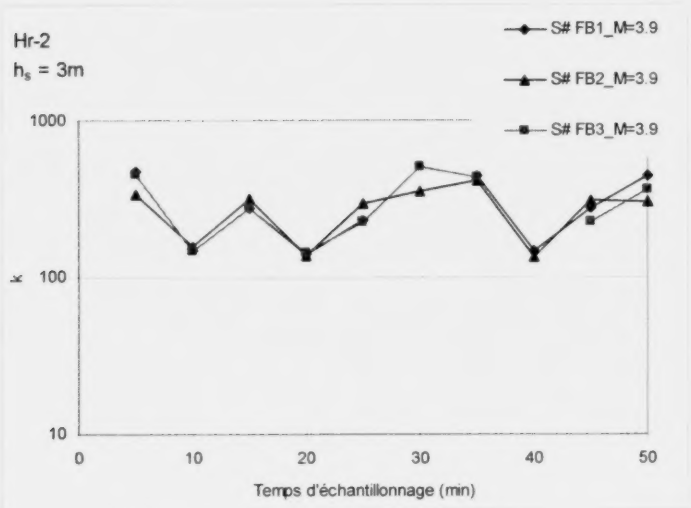


c) loin de la cheminée

Figure 5.32 Série chronologique des concentrations k pour les échantillonneurs près, à mi-chemin et éloignés de la cheminée sur le toit du bâtiment BE : essai sur le terrain du 12 août 02 : emplacement de cheminée 3.

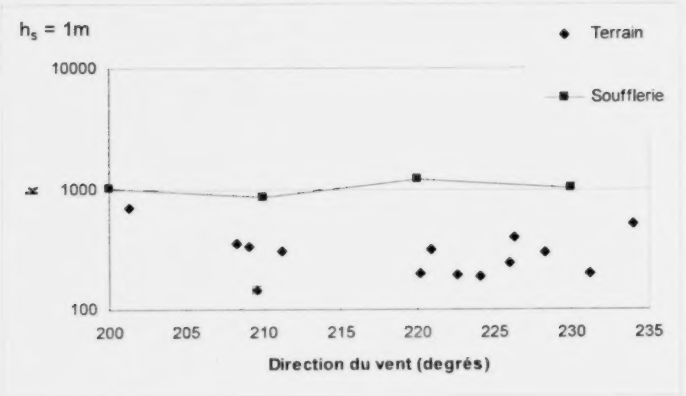


a)

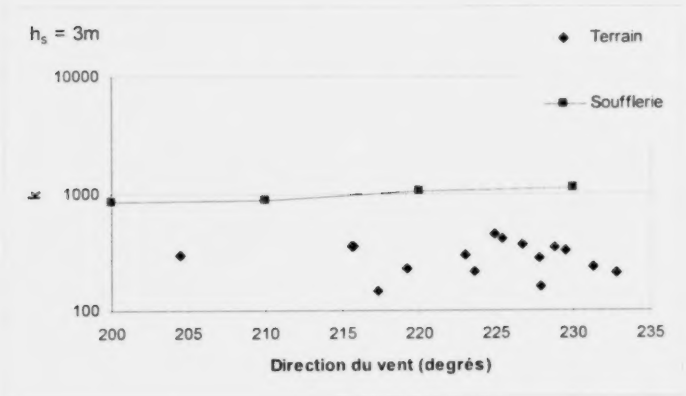


b)

Figure 5.33 Série chronologique des concentrations k pour les échantillonneurs au mur du Faubourg : essai sur le terrain du 26 août 02 : emplacement de cheminée 3.

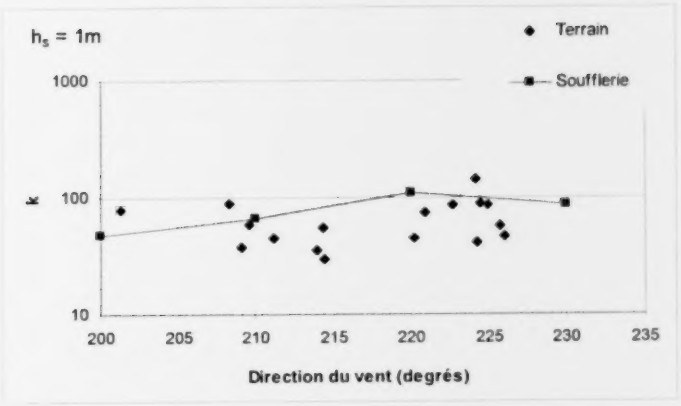


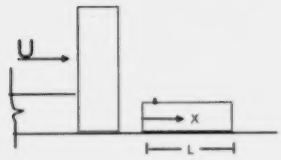
a) $M_{terrain}$ = 2-3, $M_{soufflerie}$ = 2,2



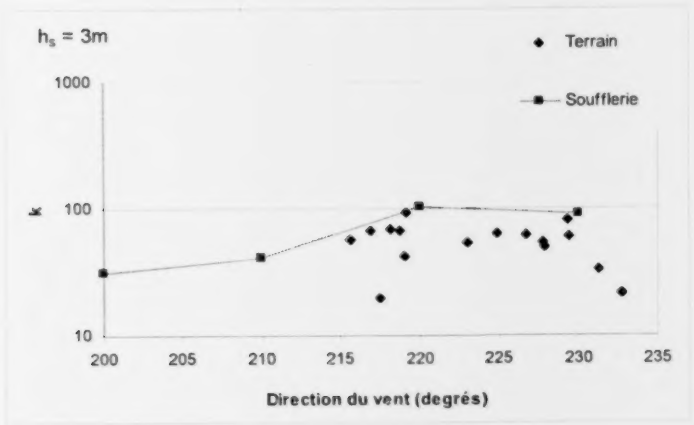
a) $M_{terrain}$ = 2-3, $M_{soufflerie}$ = 2,2

Figure 5.34 Effet de la direction du vent sur k à l'échantillonneur au mur FB2 du Faubourg : emplacement de cheminée 3.





a) $M_{terrain}$ = 1,5-2,5, $M_{soufflerie}$ = 2,2



b) $M_{terrain}$ = 1,5-2,5, $M_{soufflerie}$ = 2,2

Figure 5.35 Effet de la direction du vent sur k à l'échantillonneur au mur P2 du bâtiment BE : emplacement de cheminée 3.

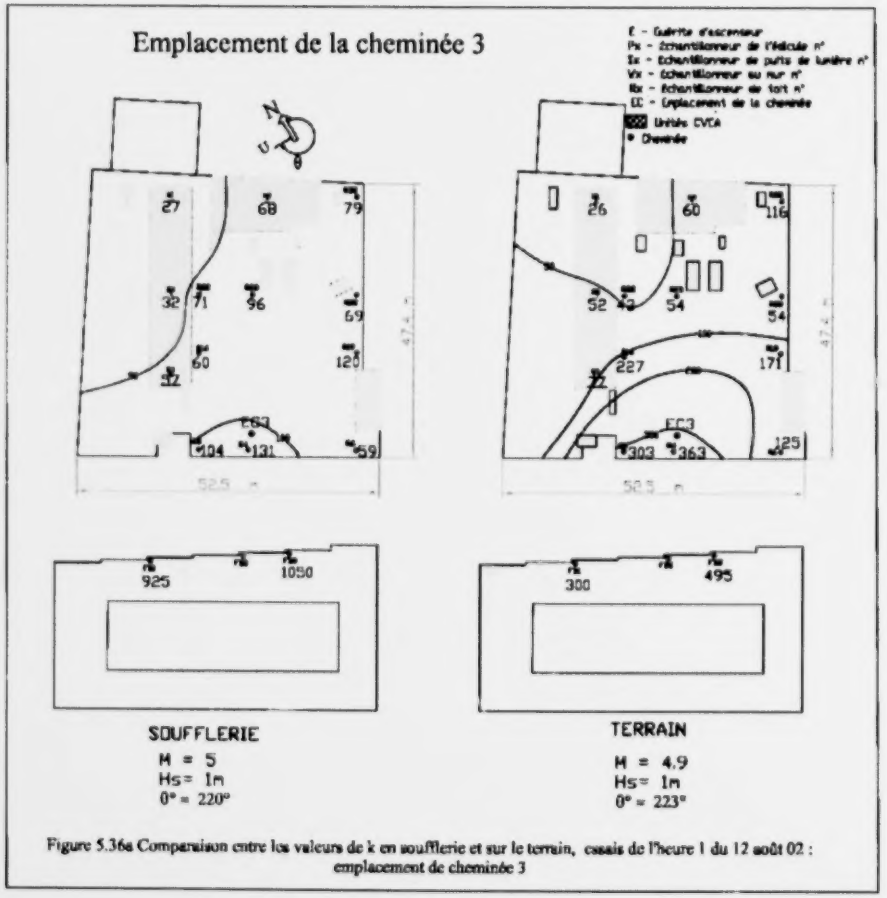


Figure 5.36a Comparaison entre les valeurs de k en soufflerie et sur le terrain, essais de l'heure 1 du 12 août 02 : emplacement de cheminée 3

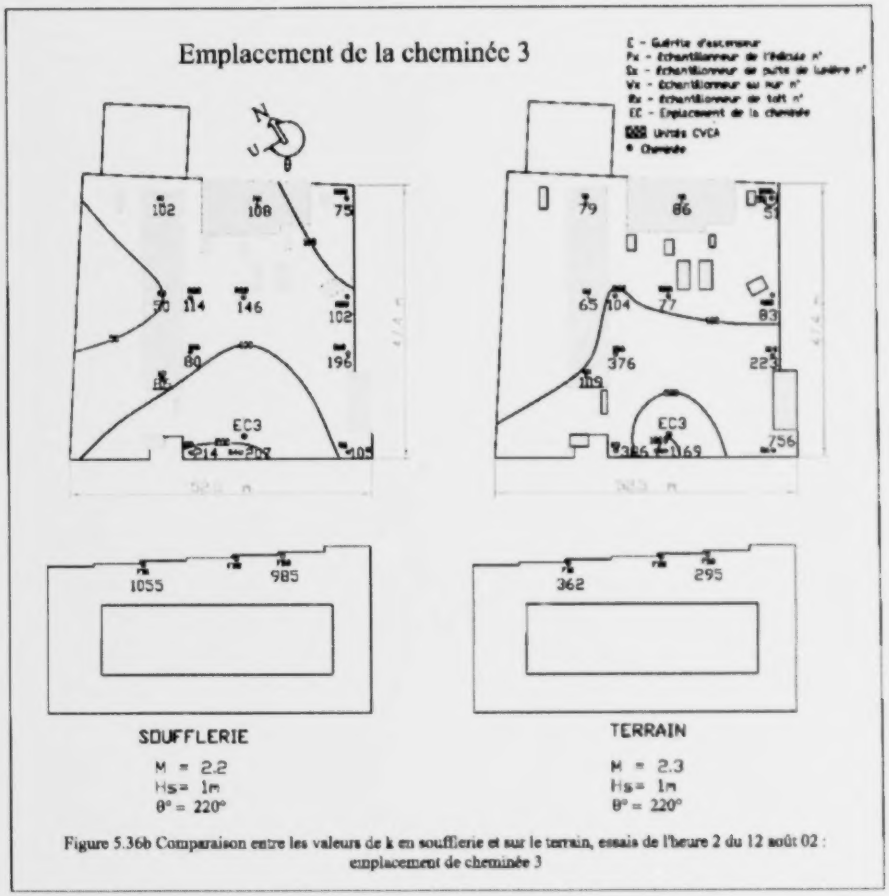


Figure 5.36b Comparaison entre les valeurs de k en soufflerie et sur le terrain, essais de l'heure 2 du 12 août 02 : emplacement de cheminée 3

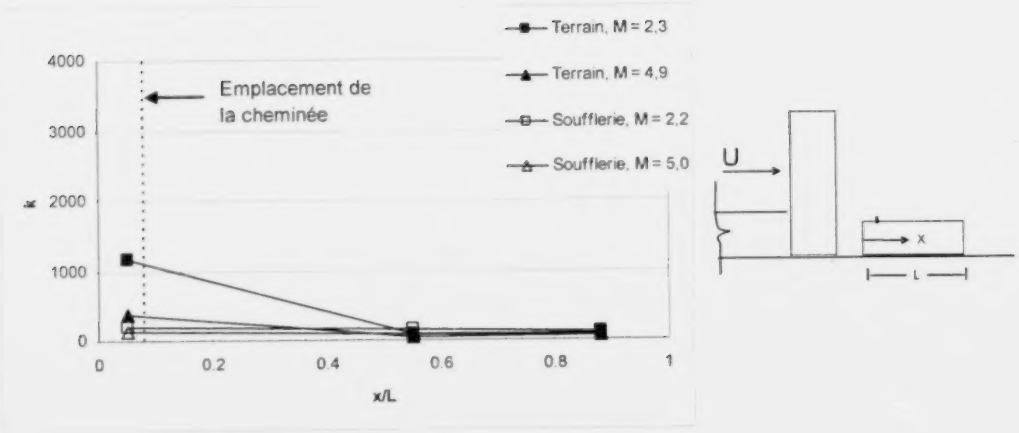


Figure 5.37 Variation de k en fonction de la distance sur le toit du bâtiment BE : essai sur le terrain du 12 août 02 : emplacement de cheminée 3.

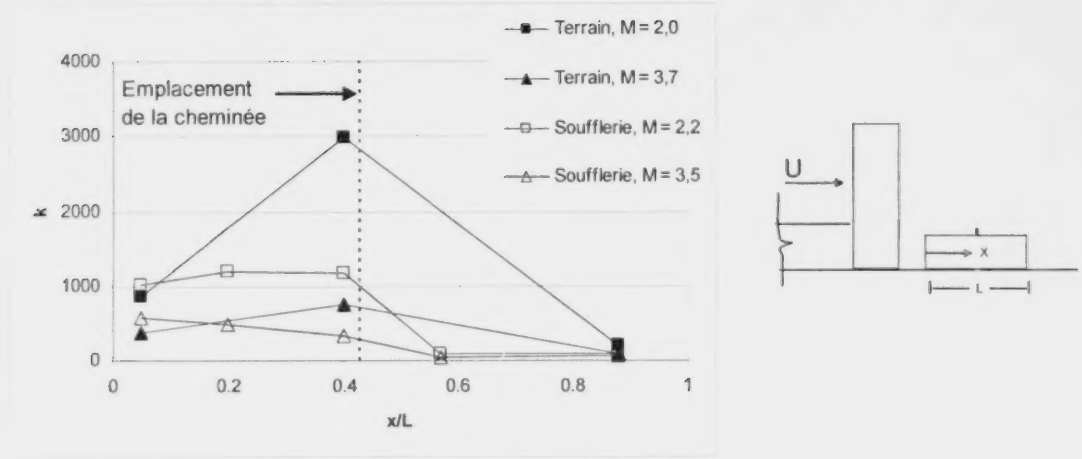


Figure 5.38 Variation de k en fonction de la distance sur le toit du bâtiment BE : essai sur le terrain du 1er oct. 02 : emplacement de cheminée 4.

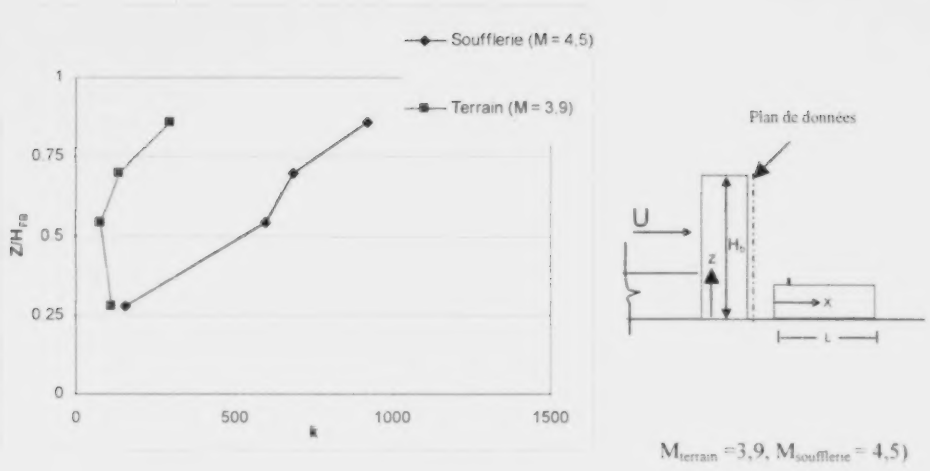
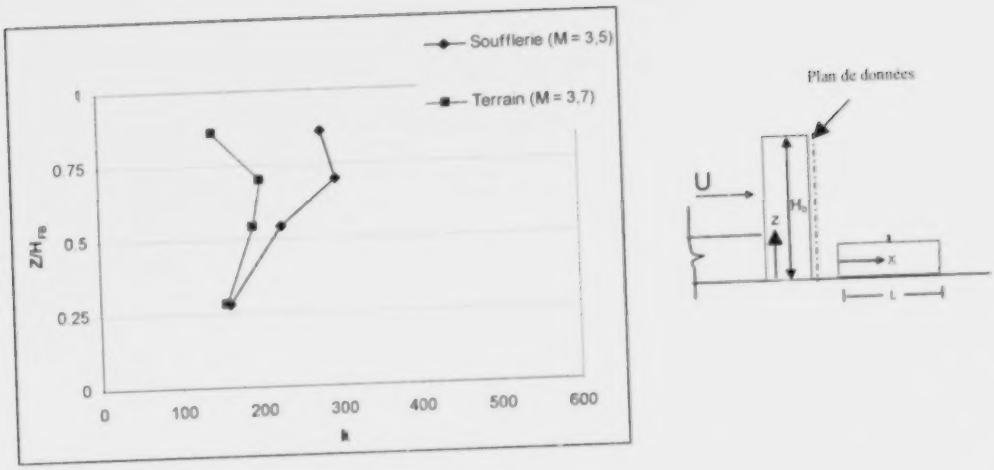
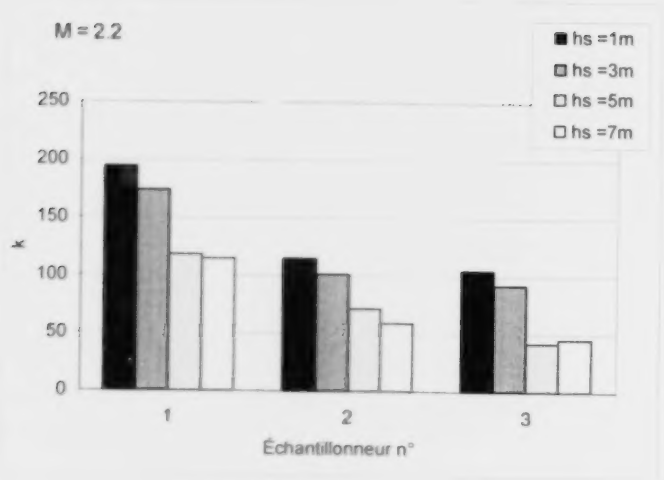


Figure 5.39 Profils verticaux de k au mur sous le vent du Faubourg : essai du 26 août 02, $h_s = 3$ m : emplacement de cheminée 3.

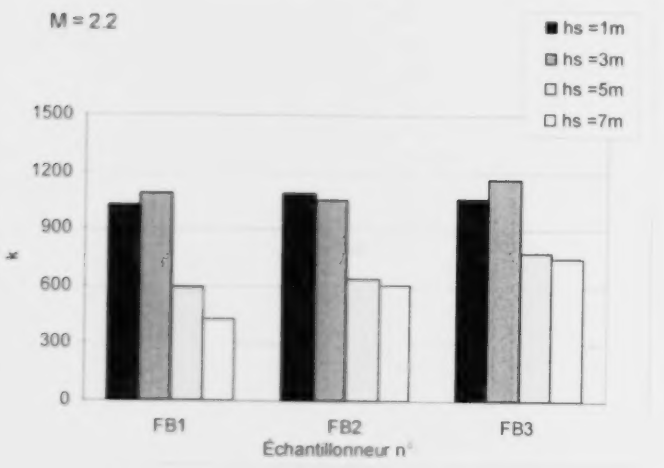


($M_{terrain}$ =3,7, $M_{soufflerie}$ = 3,5)

Figure 5.40 Profils verticaux de k au mur sous le vent du Faubourg : essai du 1er oct. 02, h_s = 1 m : emplacement de cheminée 4.

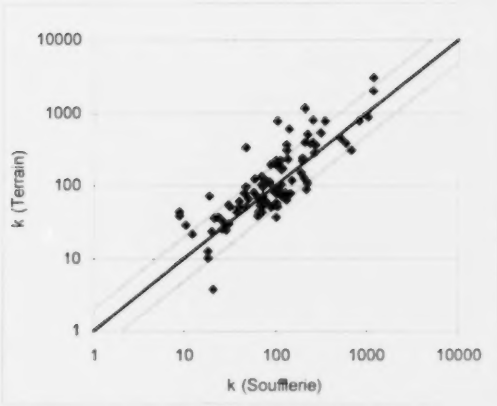


a) Échantillonneurs de toit

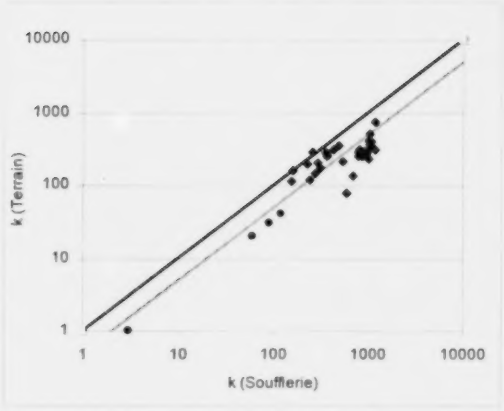


b) Échantillonneurs au mur du Faubourg

Figure 5.41 Histogramme illustrant l'effet de la hauteur de la cheminée sur k pour une direction éolienne de 220° : emplacement de cheminée 3.



a) Données obtenues sur le toit du bâtiment BE



b) Données obtenues au mur du bâtiment Faubourg

Figure 5.42 Diagrammes de dispersion des données de k obtenues en soufflerie et sur le terrain lorsque le Faubourg était au vent du bâtiment BE.

Chapitre 6

Directives de conception

Un résumé des directives de conception formulées à partir des résultats obtenus dans le cadre de l'étude est présente dans ce chapitre.

Emplacement de cheminée : en présence d'un terrain en amont dégagé, il vaut mieux placer la cheminée près du centre du toit. De cette façon, la zone de recirculation créée à partir du bord au vent du bâtiment est évitée, et l'élévation du panache, maximisée. De plus, la hauteur de panache nécessaire pour éviter tout contact avec les récepteurs au mur sous le vent s'en trouve minimisée.

En présence d'un bâtiment plus élevé au vent du bâtiment émetteur, le centre du toit peut ne pas constituer l'emplacement optimal de la cheminée en ce qui a trait aux récepteurs du bâtiment émetteur. Les concentrations sur la majeure partie du toit peuvent être réduites en plaçant plutôt la cheminée près du bord au vent du bâtiment. Cependant, ce choix d'emplacement aura pour effet d'accroître les concentrations au mur sous le vent du bâtiment adjacent (en amont).

Hauteur de la cheminée : le fait d'augmenter la hauteur de la cheminée de 1 m à 3 m réduit les concentrations près de la cheminée par un facteur de plus ou moins deux. Loin de la cheminée ($x > 20$ m), l'effet devient négligeable. Une hauteur de cheminée d'au moins 5 m est nécessaire pour obtenir une réduction significative des concentrations aux échantillonneurs éloignés.

Vitesse d'évacuation à la sortie de la cheminée : le fait d'augmenter la vitesse d'évacuation de la cheminée par un facteur de 2,5 réduit par le même facteur les concentrations près de la

cheminée. Aux récepteurs éloignés (x > 20 m), l'effet de la vitesse d'évacuation dépend de la valeur de M (le ratio de la vitesse d'évacuation par rapport à la vitesse du vent). Lorsque M est faible (1,5 < M < 4,5), ce qui est couramment le cas lorsque la vitesse du vent dépasse 5 m/s, le fait d'augmenter la vitesse d'évacuation peut ne pas être bénéfique aux récepteurs éloignés étant donné que l'élévation du panache risque de ne pas être suffisante pour les éviter. Par contre, par vents faibles, le fait de doubler la vitesse d'évacuation peut faire en sorte que M soit suffisamment élevé pour que les concentrations se trouvent réduites sur toute la surface du toit.

Comparaison entre les modèles 2003 et 1999 de l'ASHRAE : le modèle D_{min} de l'ASHRAE (1999) est moins conservateur que le modèle D_r de l'ASHRAE (2003), et fournit une meilleure estimation dans le cas des échantillonneurs éloignés (S > 30 m).

En **situation de conception type** lorsque M est faible (2,5 < M < 3,5), le modèle D_r de l'ASHRAE (2003) semble beaucoup trop conservateur, surtout en ce qui a trait aux échantillonneurs éloignés – il sous-estime en effet la dilution par un facteur de 10 dans le cas des récepteurs situés à plus de 30 m de la cheminée. Lorsque M est élevé (M = 10), cependant, le modèle D_r sous-estime la dilution des échantillonneurs situés près de la cheminée.

Emplacement des prises d'air neuf : le cas d'un bâtiment émetteur peu élevé dans le sillage d'un bâtiment plus élevé a tout spécialement été étudié. Lorsque le vent vient de la direction du bâtiment plus élevé :

- on ne devrait pas mettre les prises d'air au mur sous le vent du bâtiment au vent ;
- dans la mesure du possible, on devrait mettre les prises d'air au mur sous le vent du bâtiment émetteur.

Chapitre 7

Conclusions

Outre les directives de conception formulées et résumées au chapitre 6, cette étude a permis de dégager les conclusions qui suivent.

- Les prédictions de concentration issues des essais en soufflerie ne présentaient souvent qu'un écart de 10 % à 20 % par rapport aux valeurs de terrain, et s'en écartaient généralement par un facteur inférieur à 2.

- Certains écarts plus importants entre les données de soufflerie et de terrain ont été constatés lorsque le bâtiment émetteur se trouvait dans le sillage d'un bâtiment plus élevé. Cela pourrait s'expliquer par le faible degré de turbulence dans la soufflerie relativement à certaines configurations, mais un examen plus détaillé des données s'impose :

    - les concentrations au mur sous le vent du bâtiment élevé étaient systématiquement trop élevées dans la soufflerie, par un facteur d'environ 3 en moyenne ;
    - les concentrations mesurées en soufflerie près de la cheminée du bâtiment émetteur étaient trop faibles, surtout lorsque M était faible ;
    - les concentrations mesurées sur le toit du bâtiment émetteur, aussi bien en soufflerie que sur le terrain, étaient comparables dans le cas des échantillonneurs éloignés de la cheminée.

- Dans le cas des configurations avec terrain en amont dégagé, le modèle D_{min} [ASHRAE (1999)] a estimé les dilutions minimales sur le toit de façon plus précise que le modèle D_r [ASHRAE (2003)]. Cela démontre bien la pertinence du modèle de dilution à deux composantes, où la dilution initiale et la dilution en fonction de la distance sont toutes deux prises en compte.

Les résultats obtenus sont encourageants dans la mesure où ils démontrent la capacité générale des données de soufflerie à refléter les situations de conception réelles, tout en soulignant les limites des modèles de l'ASHRAE quant à l'estimation des dilutions réelles pour certaines configurations de bâtiments et certains emplacements de cheminée. Les directives de conception fournies dans ce rapport seront très utiles à l'ingénieur en mécanique du bâtiment au moment d'aborder certains problèmes d'application complexes, à multiples facettes, à l'égard desquels les codes et les normes ne sont d'aucun secours ou ne s'appliquent que trop généralement.

Remerciements

Les auteurs désirent remercier messieurs Yves Beaudet, Rodrigue Gravel et Claude Létourneau de l'IRSST pour la qualité de leur travail lors de la collecte des données sur le terrain ainsi que madame Lucie Renée pour l'analyse des échantillons en laboratoire.

Les étudiants suivants du Département de génie du bâtiment, génies civil et de l'environnement de l'université Concordia ont également participé à la collecte des données sur le terrain et la réalisation des essais en soufflerie: Heather Knox, Joseph Caporicci et Enrico Yu.

En terminant, les auteurs remercient sincèrement les commentaires soumis par les évaluateurs du rapport, plusieurs des commentaires ayant été intégrés au présent rapport.

References

ASCE (1999) "Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures", Manual of Practice No. 67, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 20191-4400, USA.

ASHRAE (1999) Chapter 43, "Building Air Intake and Exhaust Design", ASHRAE Applications Handbook American Society of Heating, Refrig. and Air-Cond. Eng., Inc., Atlanta.

ASHRAE (2003) Chapter 44, "Building Air Intake and Exhaust Design", ASHRAE Applications Handbook, American Society of Heating, Refrig. And Air-Cond. Eng., Inc., Atlanta.

Briggs. (1984) "Plume rise and buoyancy effects", in Atmospheric Science and Power Production. Randerson. Ed, U.S. Department of energy D.O.E./TIC-27601 (DE 84005177), Washington, D.C.

Engineering Sciences Data Unit (1985) "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, Data Item 85020, FSDU International Ltd., London.

Georgakis, K., Smith, J., Goodfellow, H. and Pye, J. (1995) "Review and evaluation of models estimating the minimum atmospheric dilution of gases exhausted near buildings", Journal of the Air & Waste Management Assoc., Vol. 45, pp. 722-729.

Higson, H. L., Griffiths, R.F., Jones, C.D. and Hall, D.J. (1994) "Concentration measurements around an isolated building: a comparison between wind tunnel and field data", Atmospheric Environment, Vol. 28, No. 11, pp. 1827-1836.

Mavroidis, I., Griffiths, R.F. and Hall, D.J. (2003) "Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles", Atmospheric Environment, Vol. 37, pp. 2903-2918.

Meroney, R. N. (2003) Personal communication.

Meroney, R. N., Leitl, B., Rafailidis, S. and Schatzmann, M. (1999) "Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 333-345.

Petersen, R. and LeCompte J. (2002) "Exhaust contamination of hidden versus visible air intakes – Final Report", ASHRAE Research Project 1168-TRP, American Society of Heating, Refrig. and Air-Cond. Eng., Inc., Atlanta.

Saathoff P., Stathopoulos T., Lazure L, Peperkamp H. (2002) "The influence of roof top structure on the dispersion of exhaust from a rooftop stack", ASHRAE Transactions,108

Schulman and Scire, J. (1991) "The effect of stack height , exhaust speed, and wind direction on concentrations from a rooftop stack", ASHRAE Transactions, volume 97, pp 573-582 part 2.

Snyder, W. H., (1994) "Downwash of plumes in the vicinity of buildings: a wind tunnel study", Recent Research Advances in the Fluid Mechanics of Turbulent Jets and Plumes, Kluwer Academic Pub. , 343-356.

Stathopoulos T., Lazure L, Saathoff, P. (1999) "Tracer gas investigation of reingestion of building exhaust in an urban environment", IRSST research report R-213, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, Montreal, Canada

Stathopoulos T., Lazure L, Saathoff, P. and Wei. X. (2002) "Dilution of exhaust from a roof top stack on a cubical building in an urban environment", Atmospheric Environment 36, 4577-4591.

Turner, D.B. (1994) Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, 2nd Ed., CRC Press.

Wieringa, J. (1993) "Representative roughness parameters for homogeneous terrain," Boundary-Layer Meteorology, 63, 323-363.

Wilson, D (1979) "Flow patterns over flat-roofed buildings and application to exhaust stack design", ASHRAE Transactions, 85, part 2, 284-295.

Wilson, D.J. and Lamb, B., (1994) "Dispersion of exhaust gases from roof level stacks and vents on a laboratory building", Atmospheric Environment, 28, 3099-3111.

Wilson, D.J., Fabris, I., Chen, J. and Ackerman, M. (1998) "Adjacent building effects on laboratory fume hood exhaust stack design", ASHRAE Research Report 897, American Society of Heating and Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta Ga.

Wilson, D.J. (1995) Concentration Fluctuations and Averaging Time in Vapor Clouds, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York.

ANNEXE A

EMPLACEMENTS DE LA CHEMINÉE ET DES ÉCHANTILLONNEURS LORS DES ESSAIS SUR LE TERRAIN

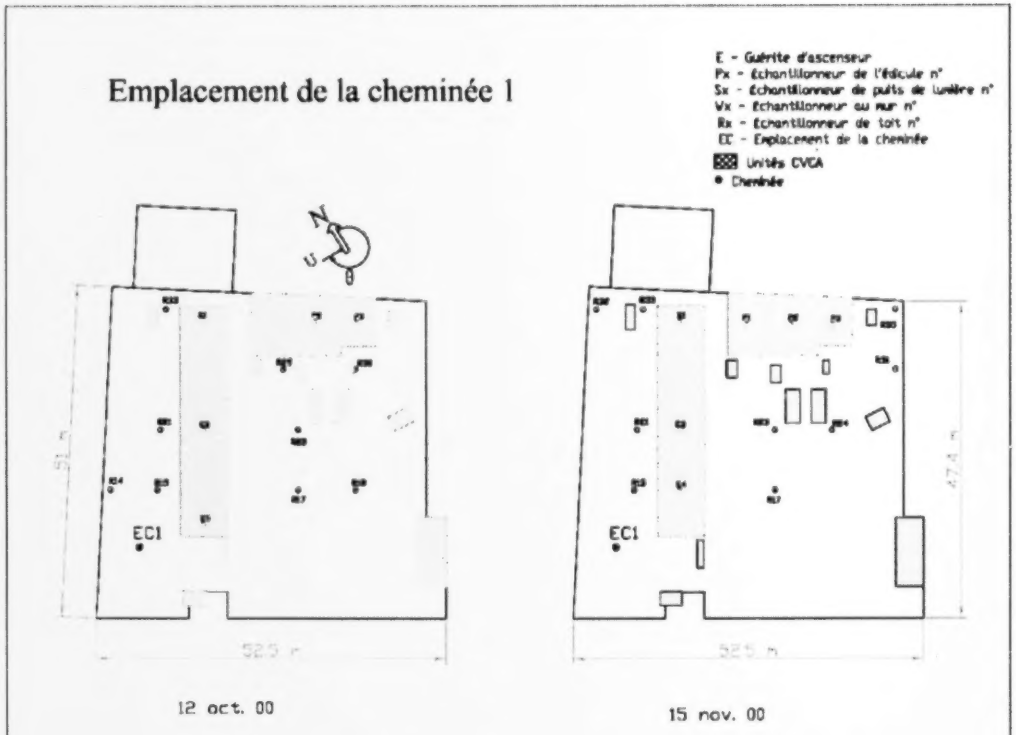


Figure A-1 Emplacement des échantillonneurs pour les essais sur le terrain, 12 oct. 00 et 15 nov. 00.

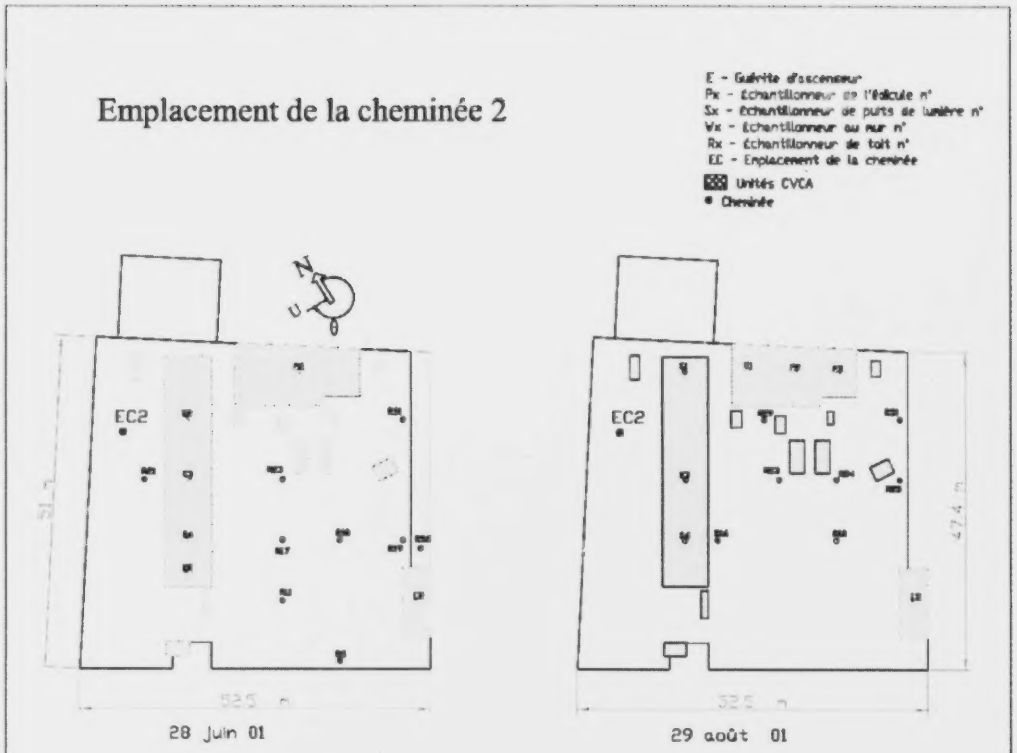


Figure A-2 Emplacement des échantillonneurs pour les essais sur le terrain, 28 juin 01 et 29 août 01.

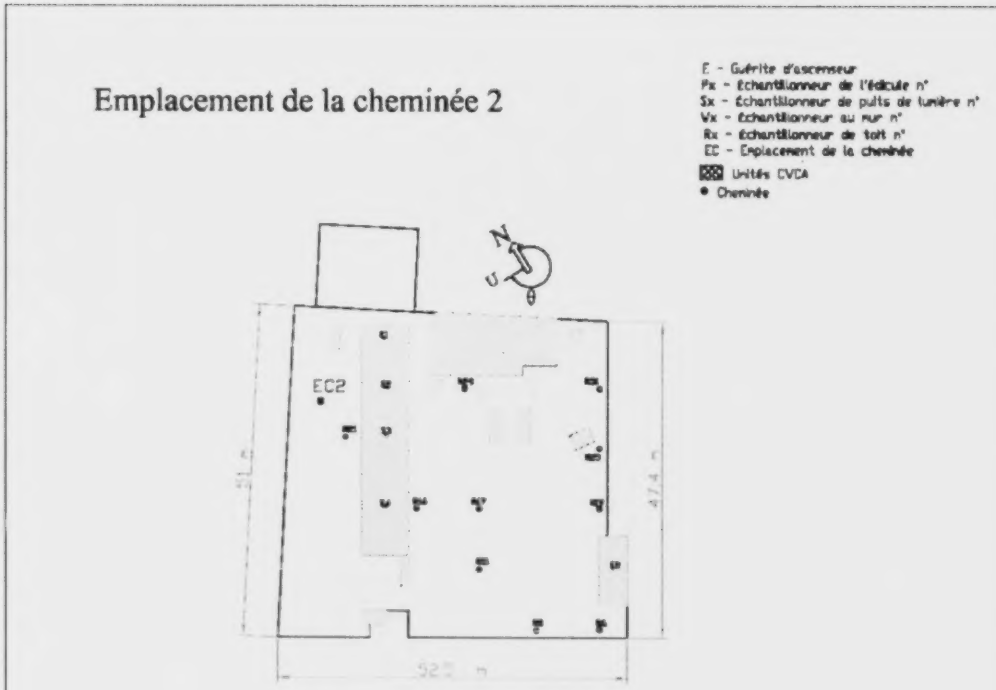


Figure A-3 Emplacement des échantillonneurs pour les essais sur le terrain, 30 oct. 01

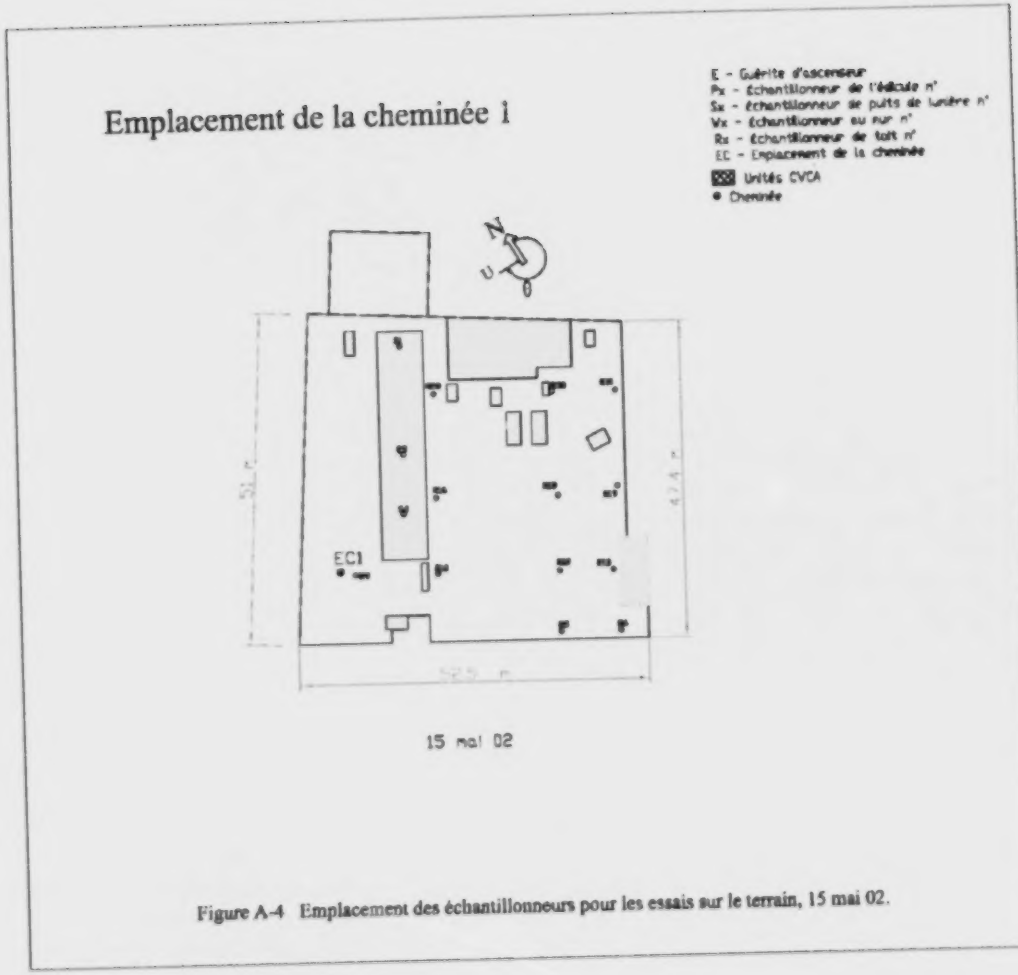


Figure A-4 Emplacement des échantillonneurs pour les essais sur le terrain, 15 mai 02.

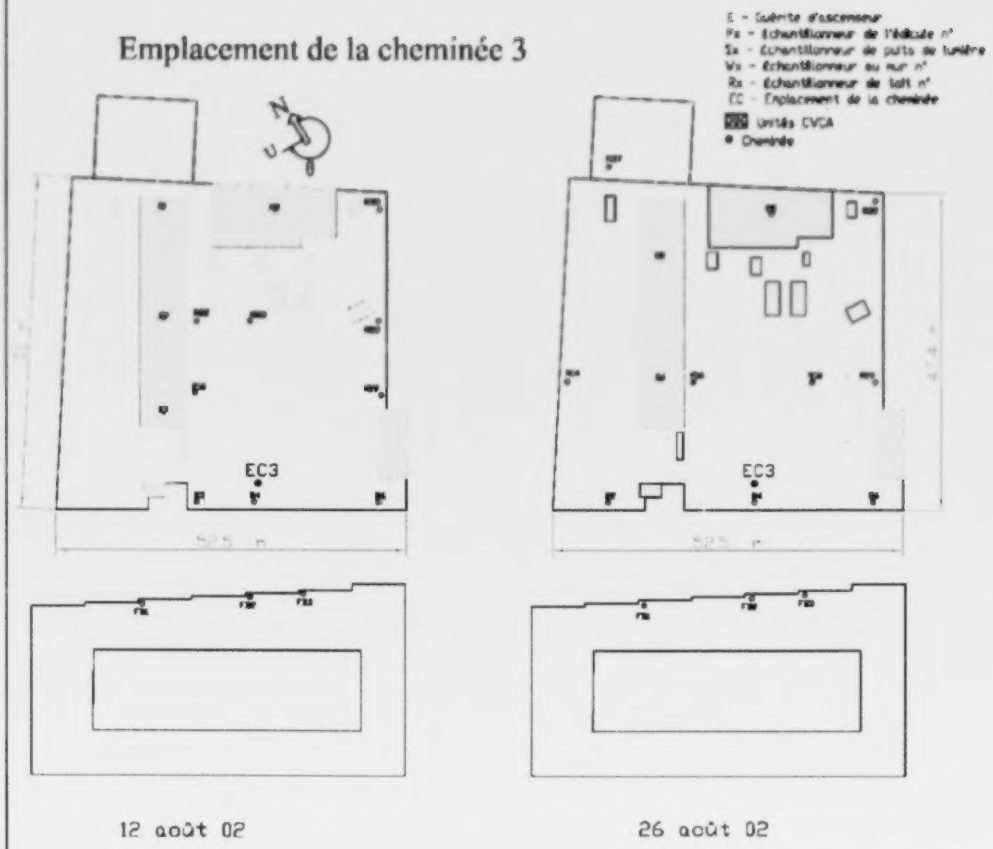


Figure A-5 Emplacement des échantillonneurs pour les essais sur le terrain, 12 août 02 et 26 août 02.

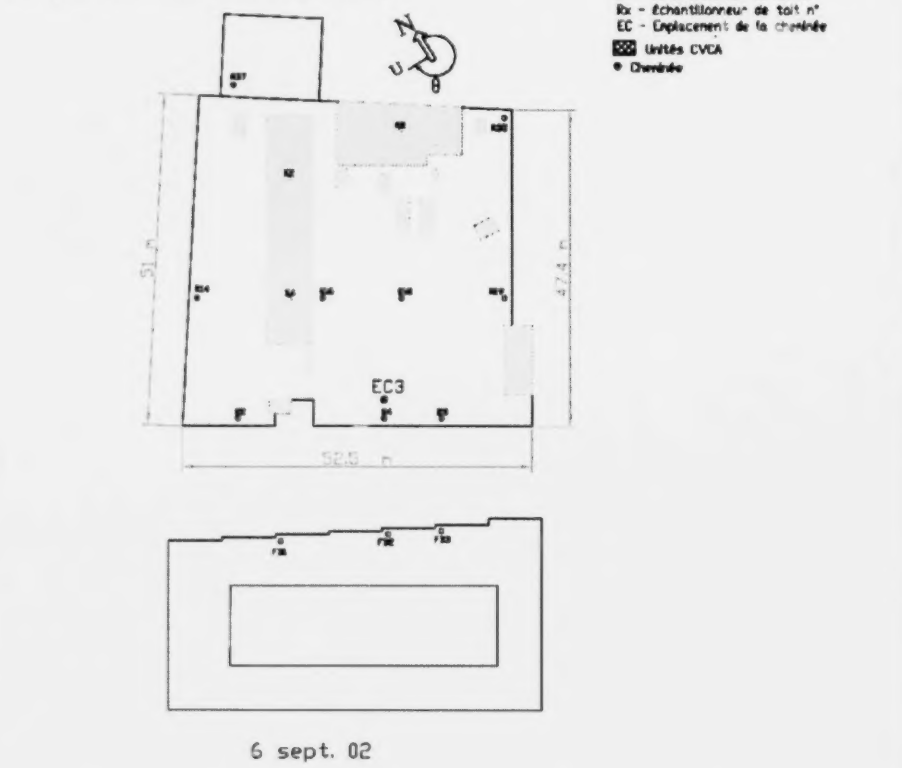


Figure A-6 Emplacement des échantillonneurs pour les essais sur le terrain, 6 sept. 02.

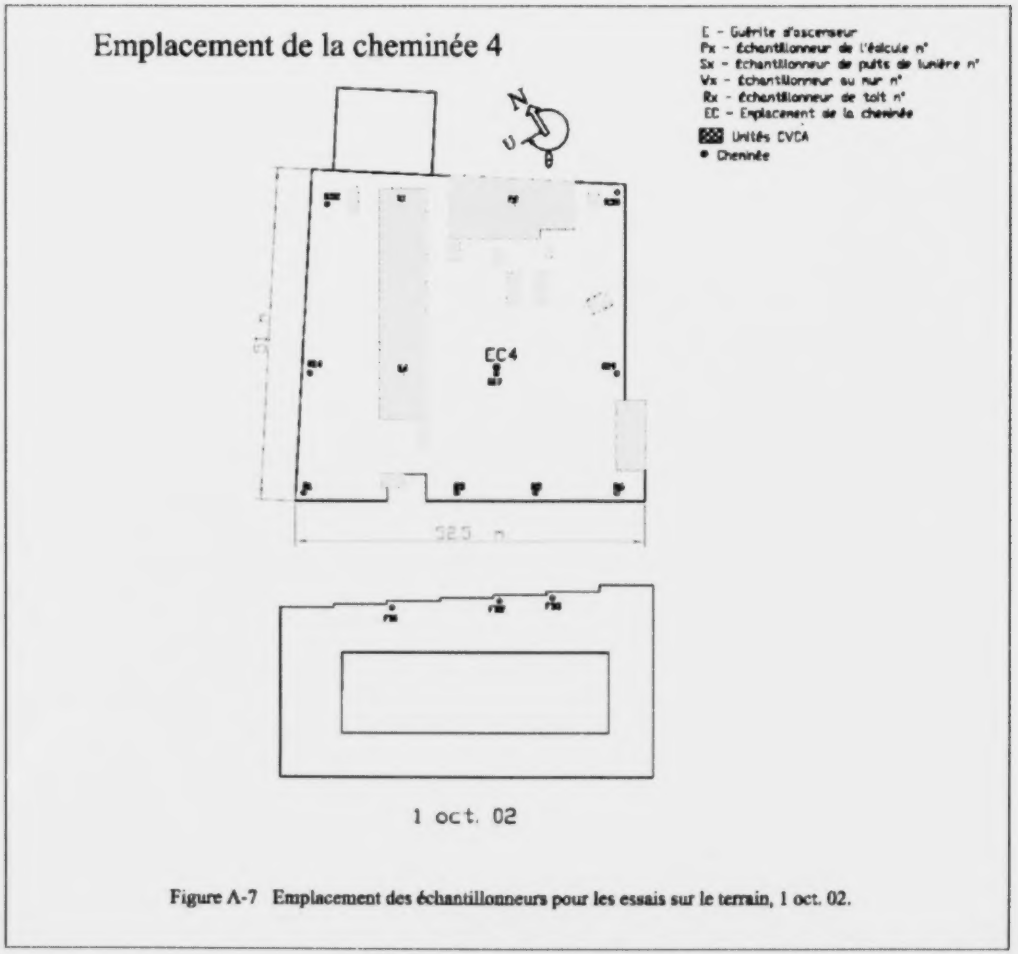


Figure A-7 Emplacement des échantillonneurs pour les essais sur le terrain, 1 oct. 02.

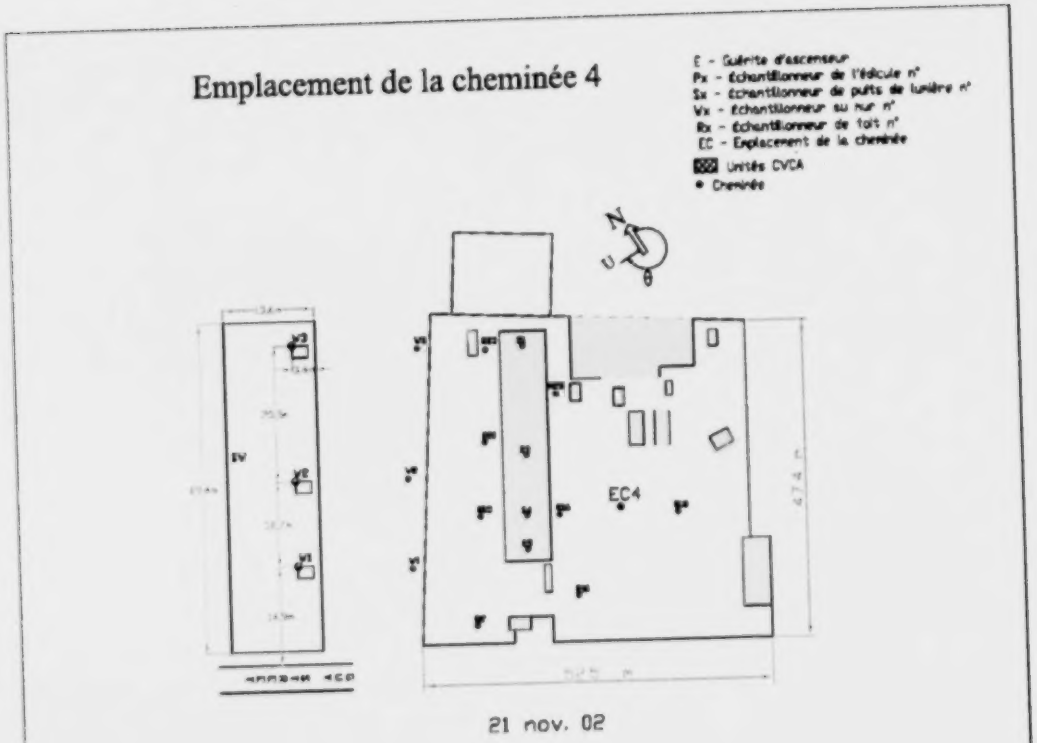


Figure A-8 Emplacement des échantillonneurs pour les essais sur le terrain, 21 nov. 02

ANNEXE B

COMPARAISON DES DONNÉES SUR LE TERRAIN ET EN SOUFFLERIE

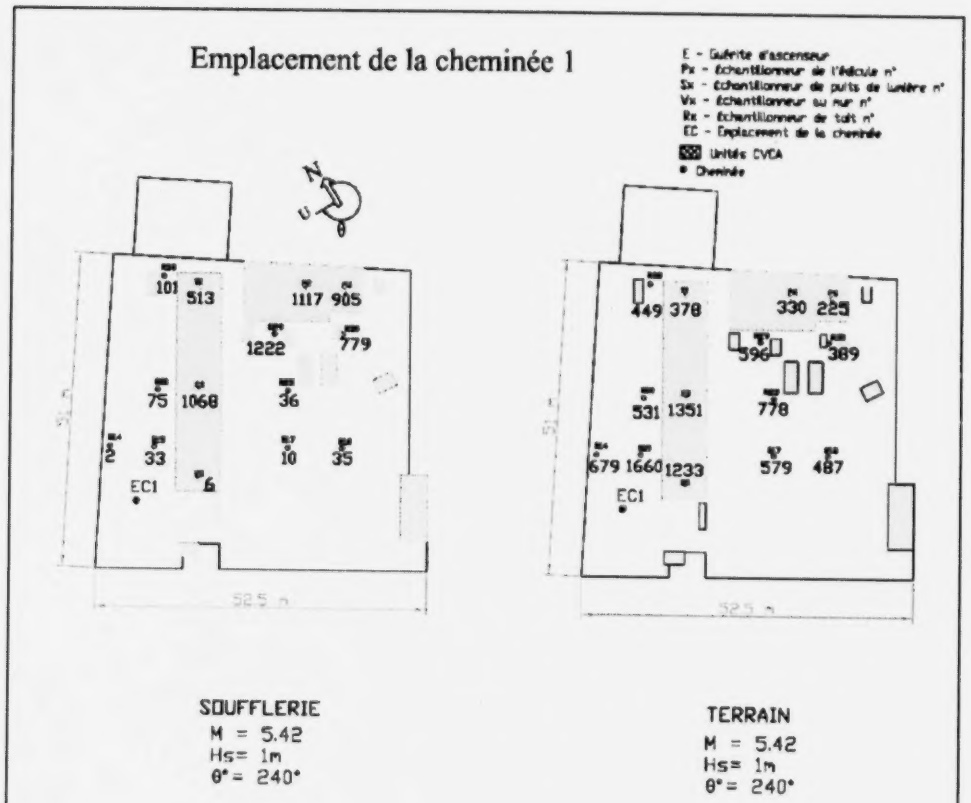


Figure B-1 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 1, 12 oct. 00 : essai de l'heure 1.

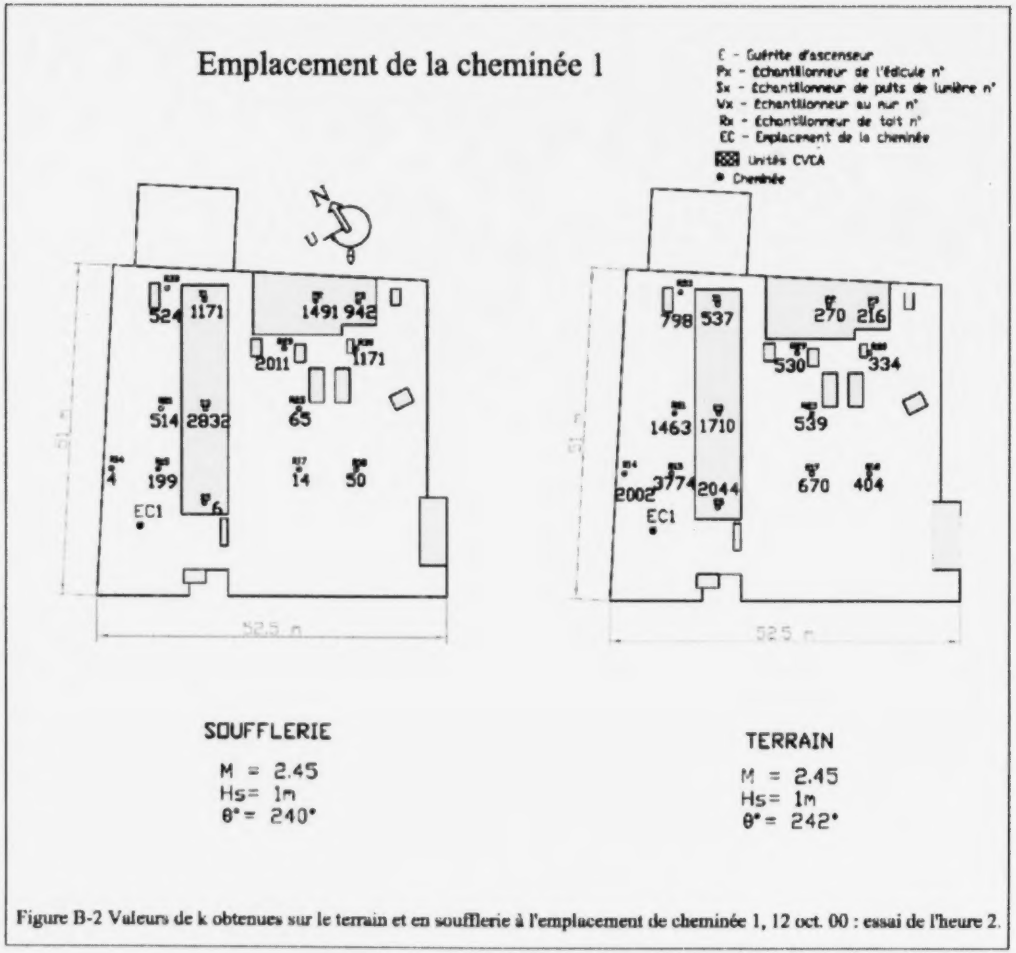


Figure B-2 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 1, 12 oct. 00 : essai de l'heure 2.

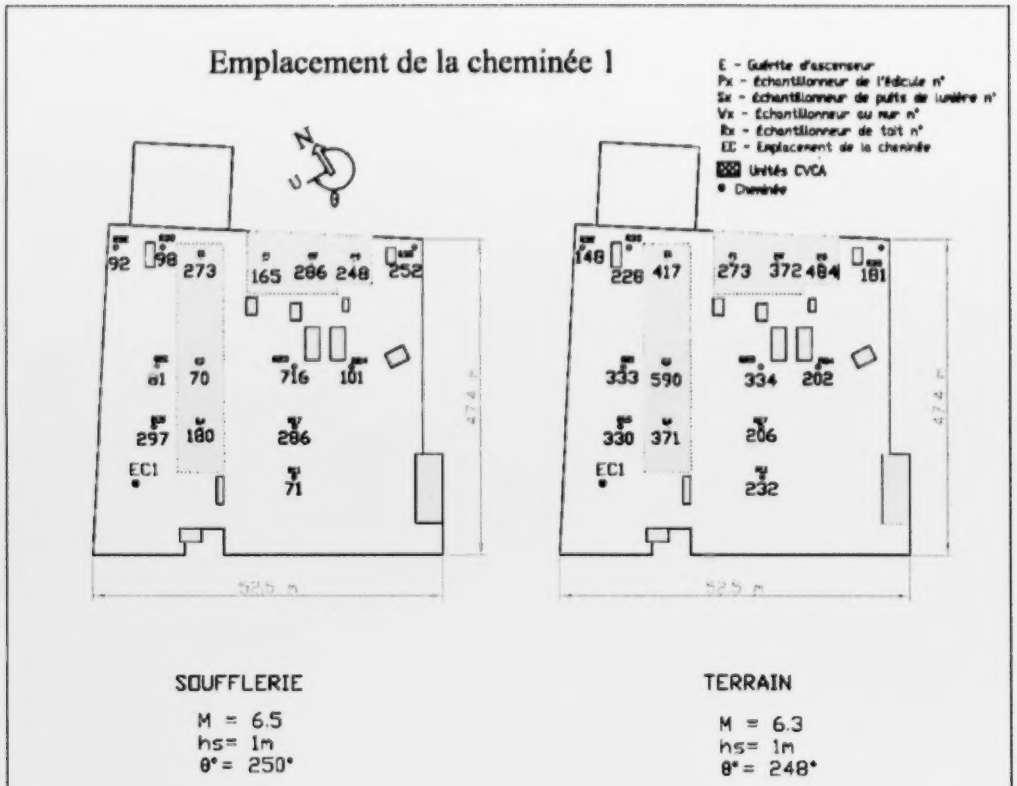


Figure B-3 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 1, 15 nov. 02 : essai de l'heure 1.

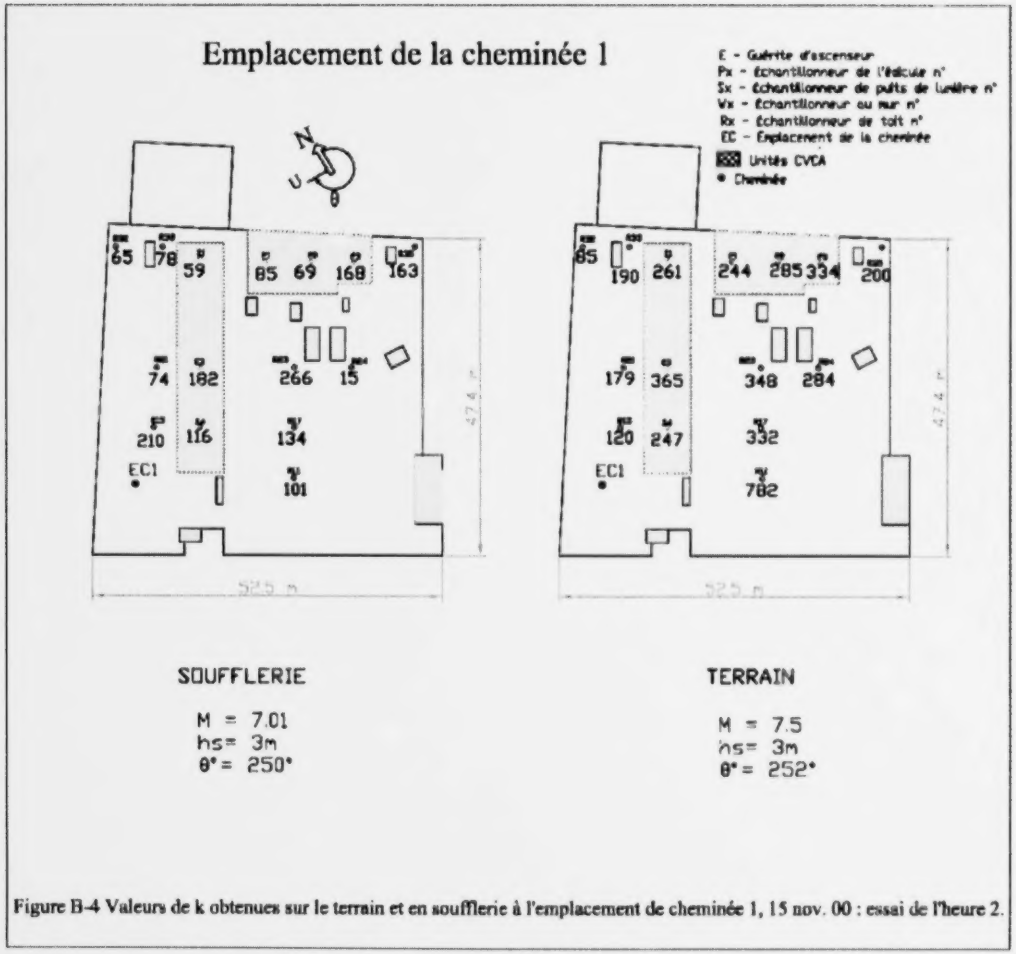


Figure B-4 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 1, 15 nov. 00 : essai de l'heure 2.

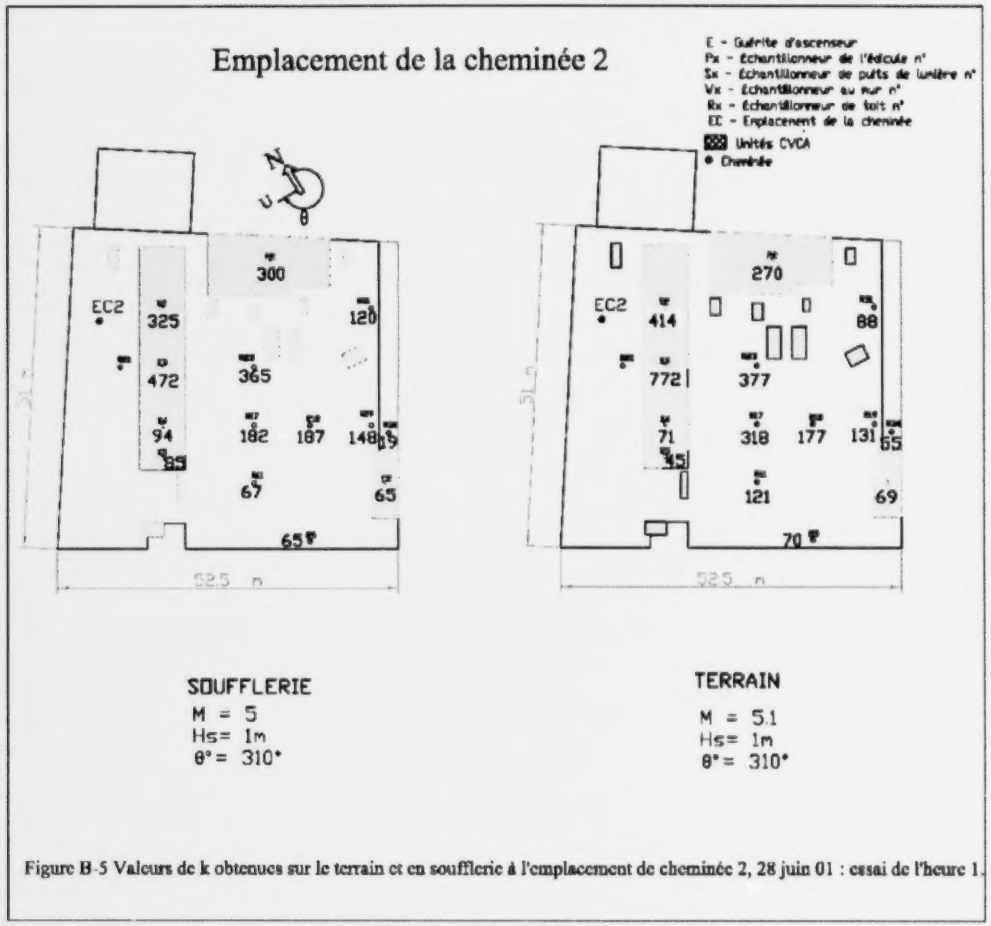


Figure B-5 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 28 juin 01 : essai de l'heure 1.

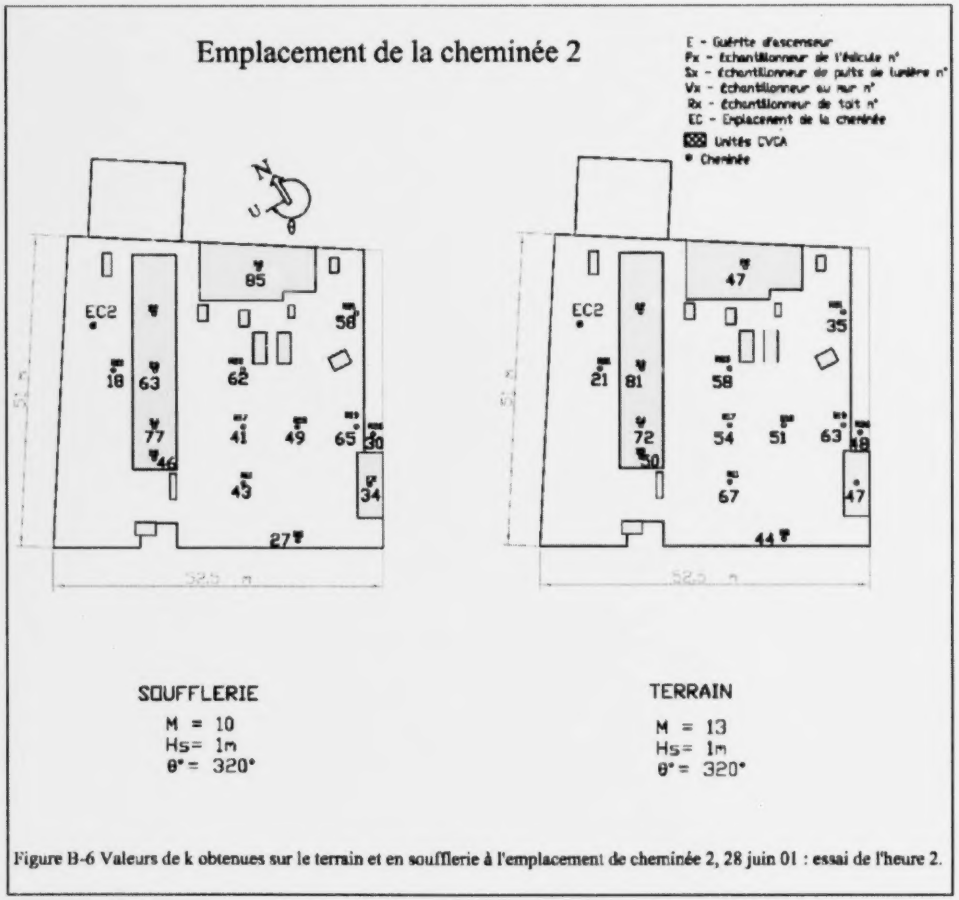


Figure B-6 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 28 juin 01 : essai de l'heure 2.

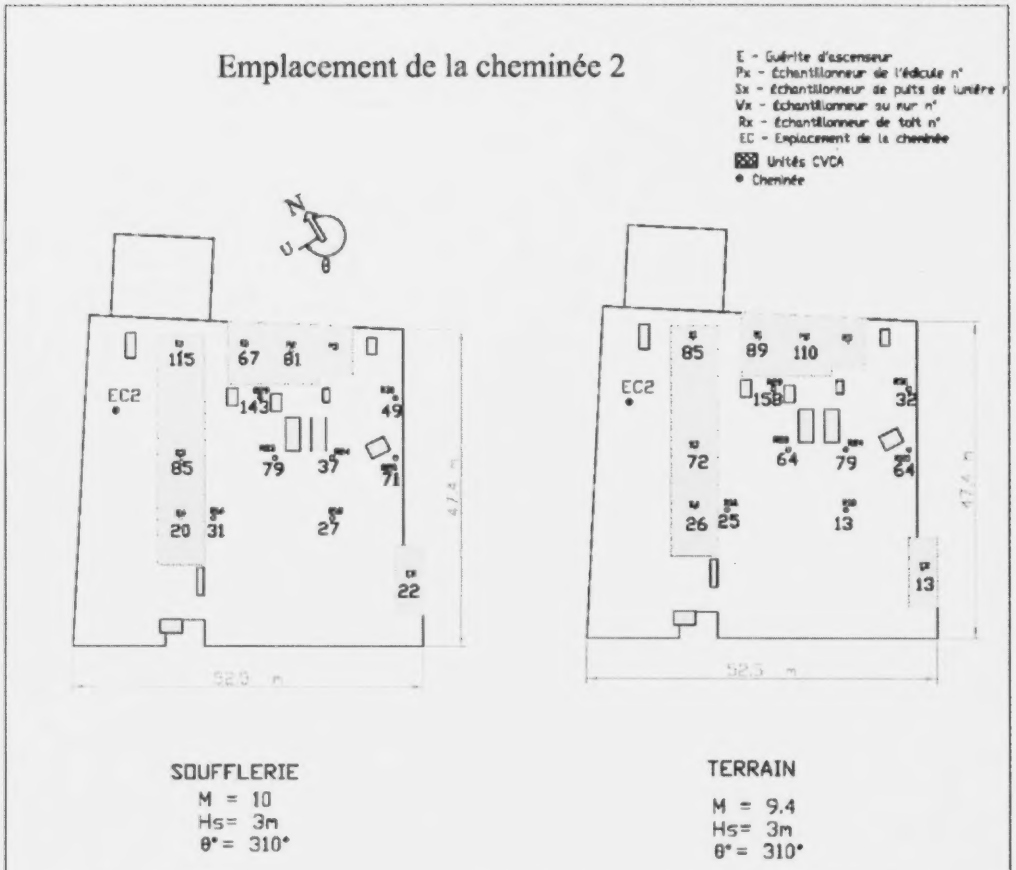


Figure B-7 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 29 août 01 : essai de l'heure 1

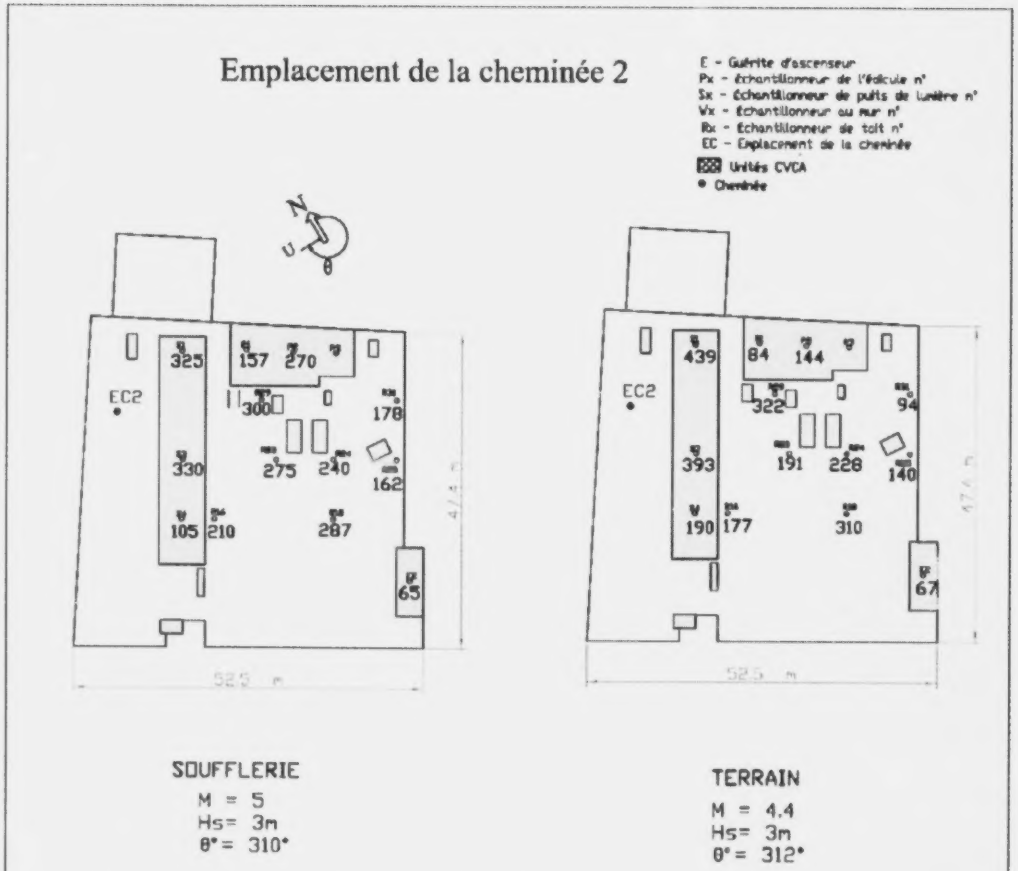


Figure B-8 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 29 août 01 : essai de l'heure 2.

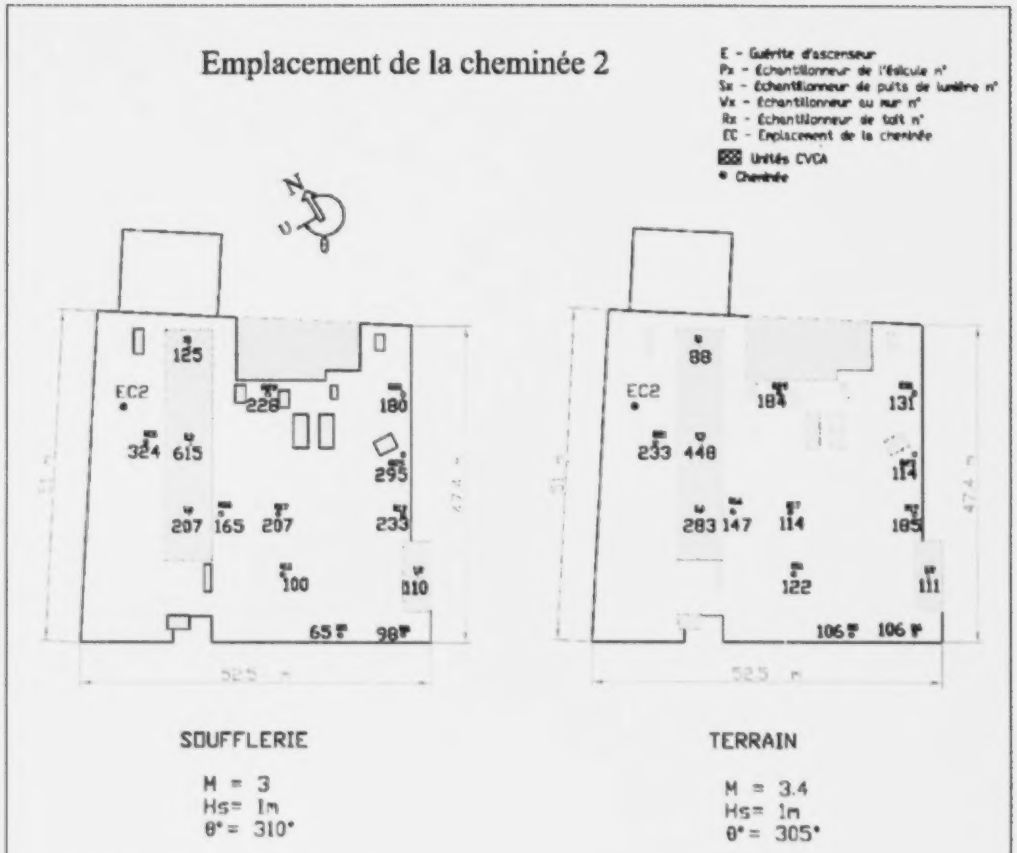


Figure B-9 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 30 oct. 01 : essai de l'heure 1.

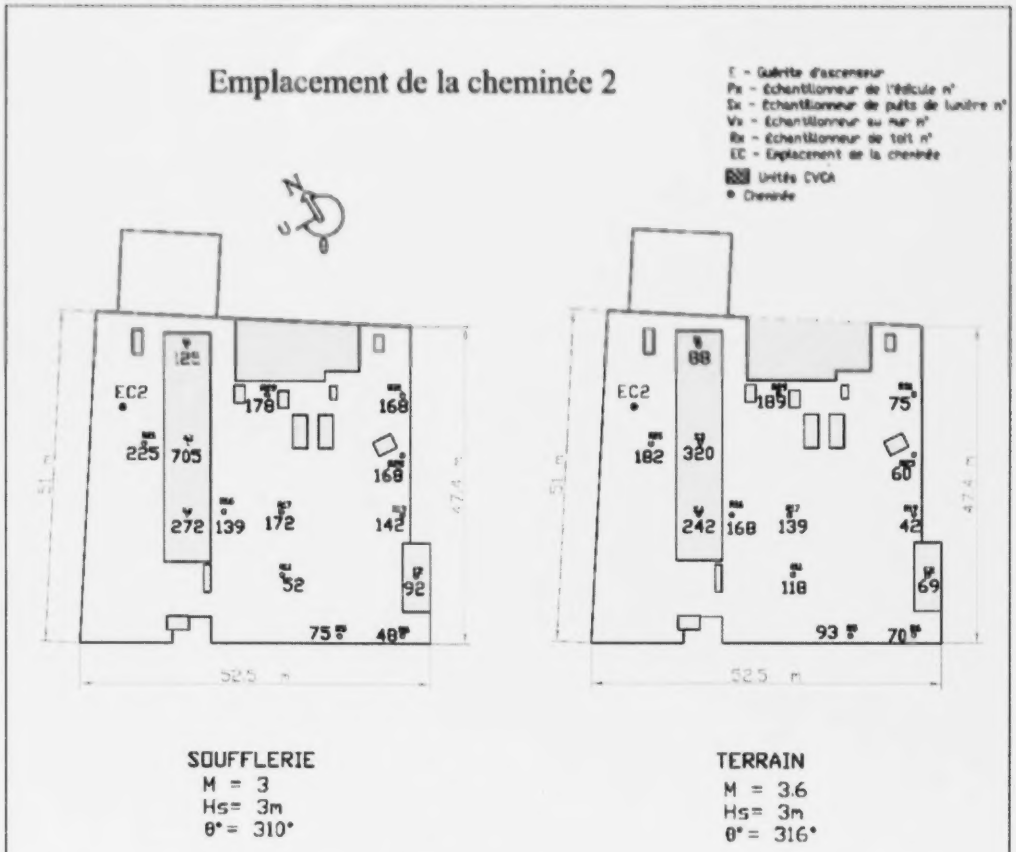


Figure B-10 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 2, 30 oct. 01 : essai de l'heure 2.

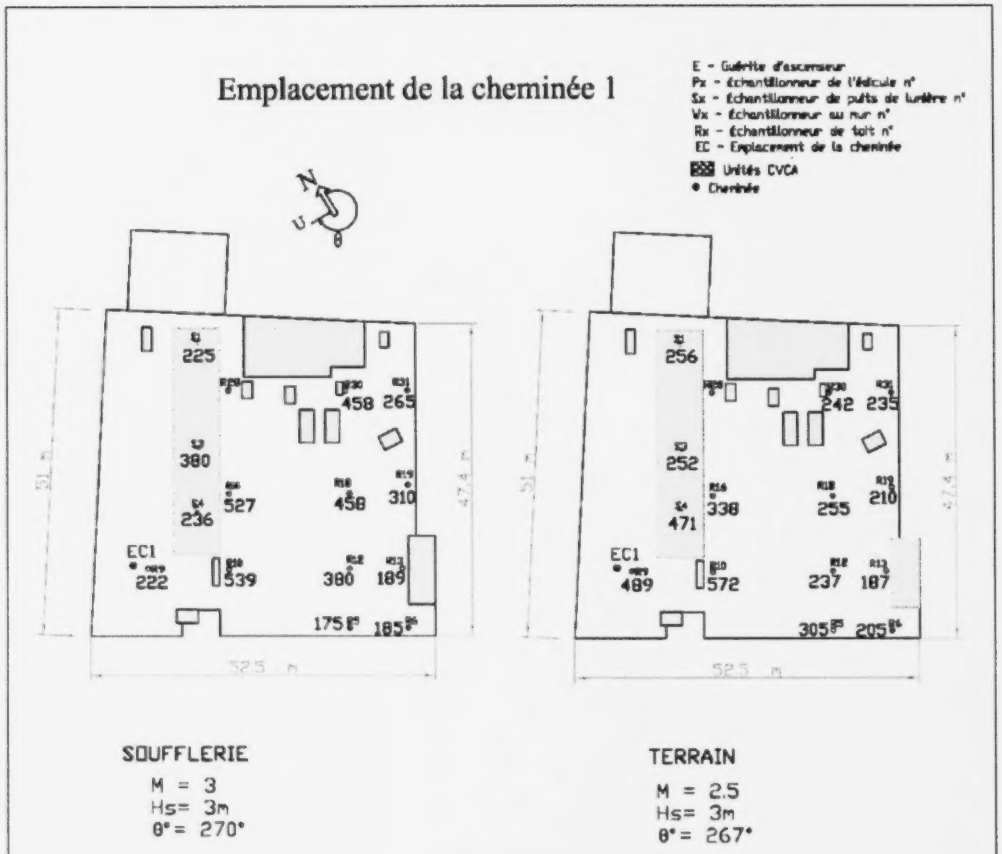


Figure B-11 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 1, 15 mai 02 : essai de l'heure 1.

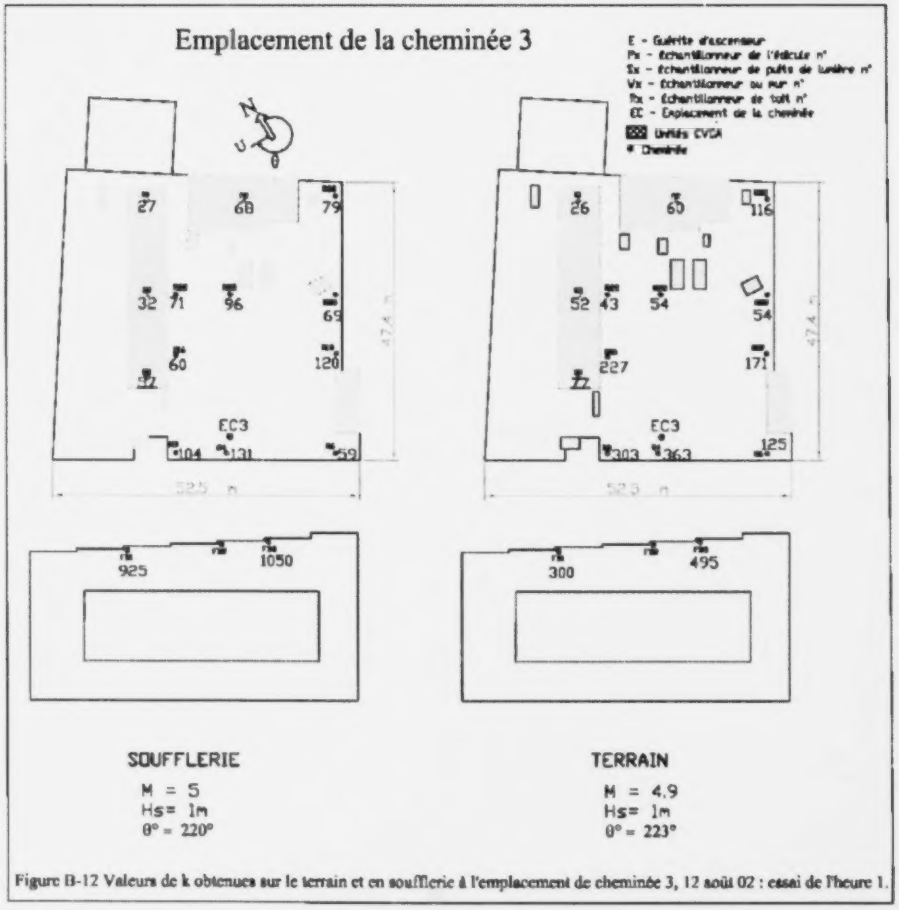


Figure B-12 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 3, 12 août 02 : essai de l'heure 1.

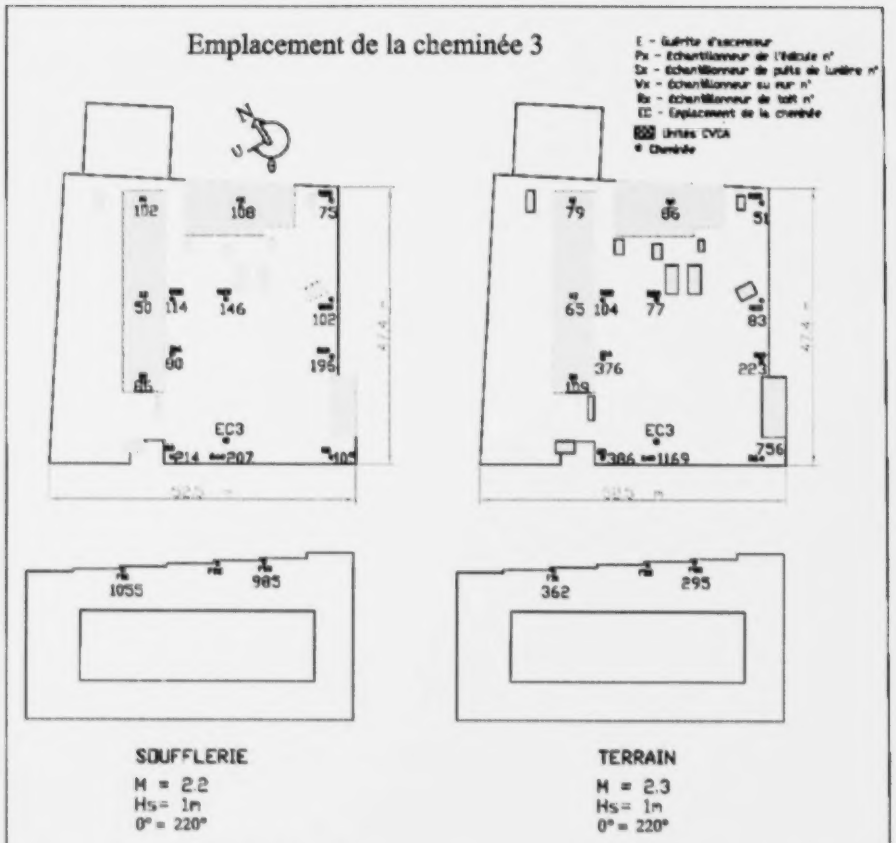


Figure B-13 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 3, 12 août 02 : essai de l'heure 2.

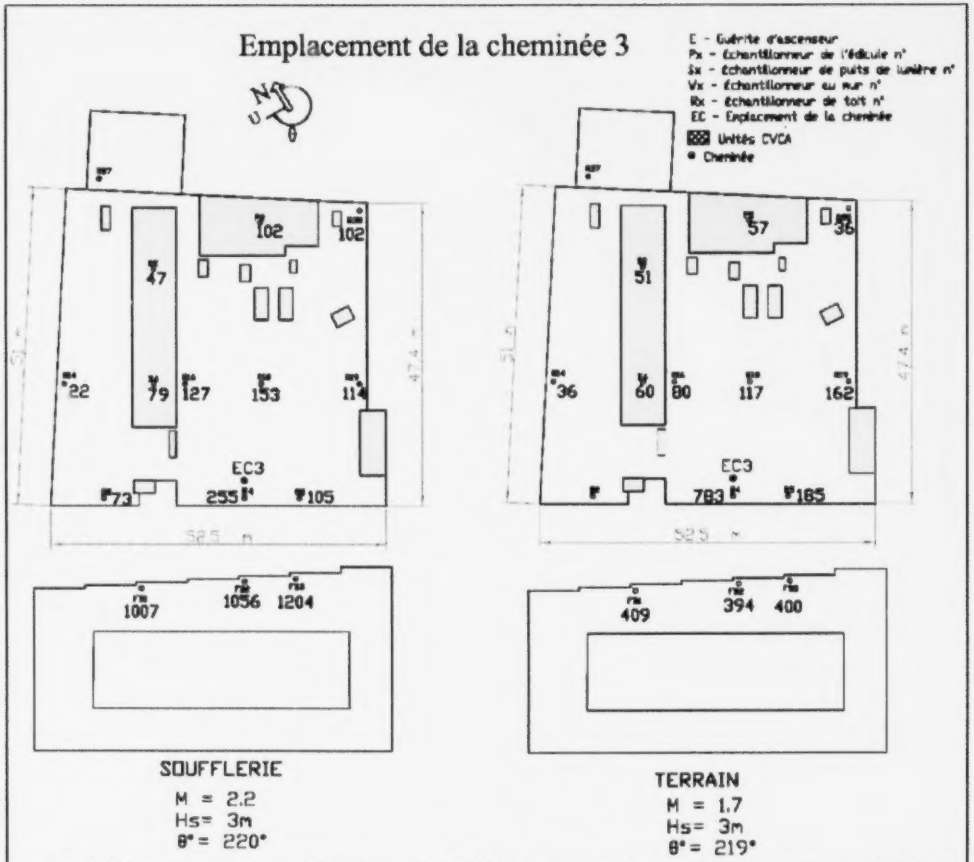


Figure B-14 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 3, 28 août 02 : essai de l'heure 1.

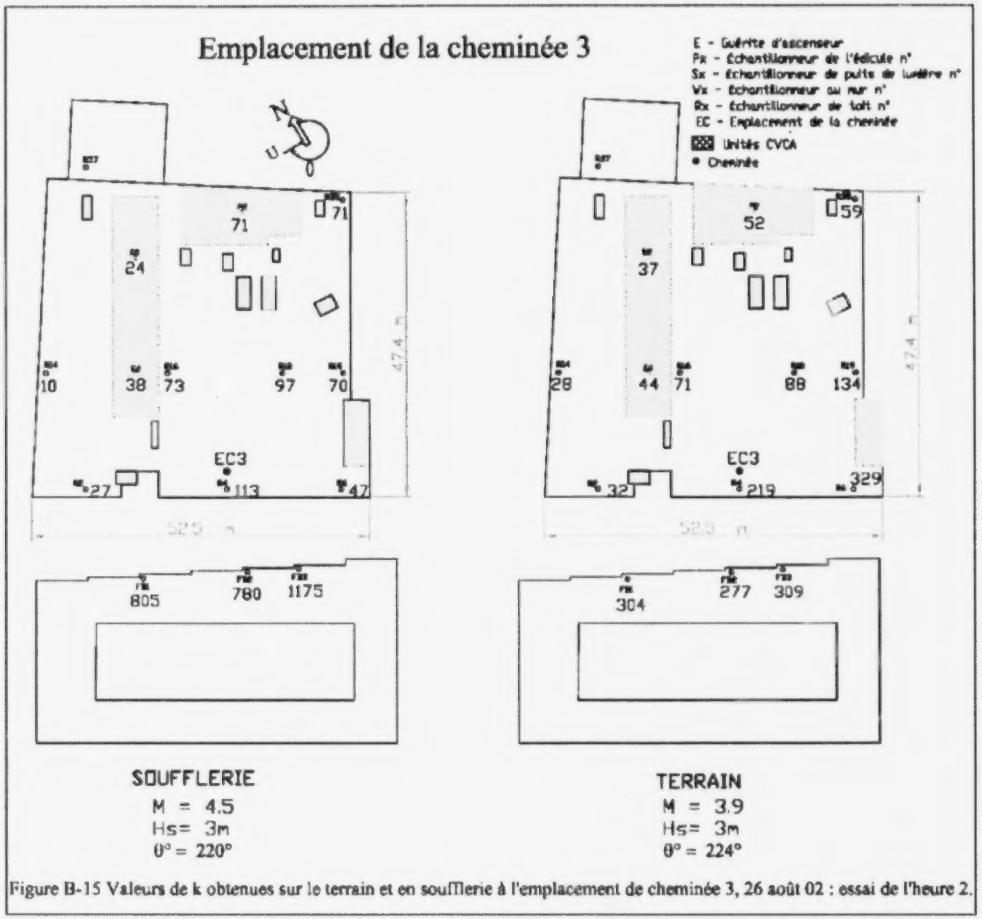


Figure B-15 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 3, 26 août 02 : essai de l'heure 2.

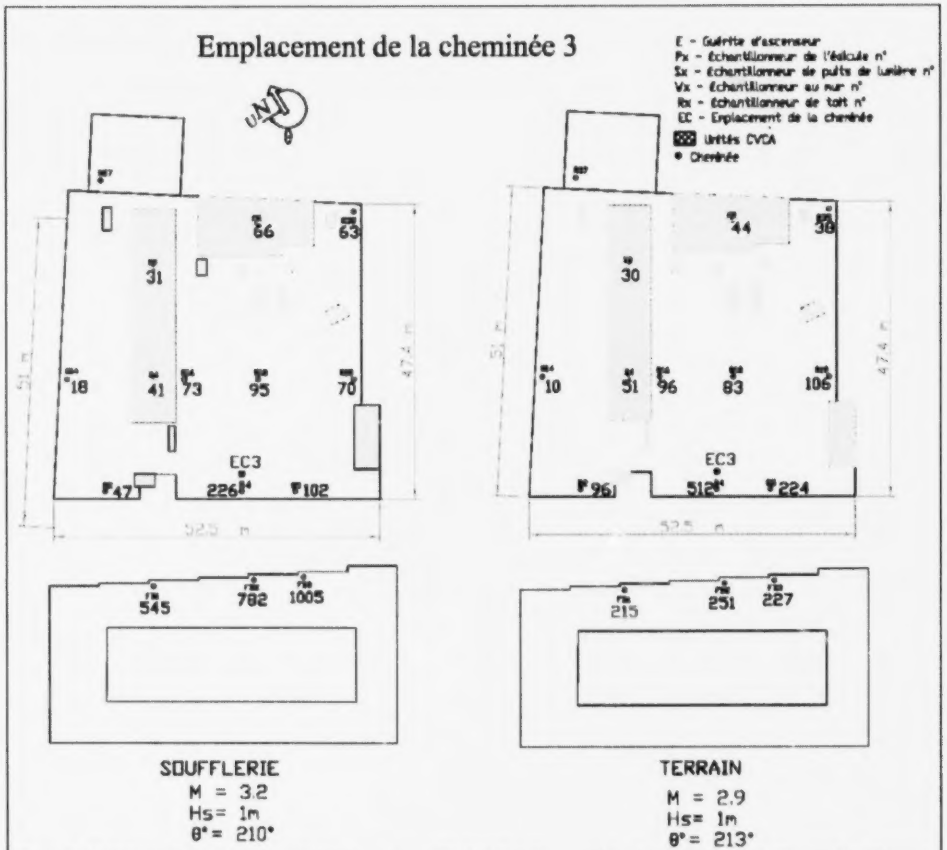


Figure B-16 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 3, 6 sept. 02 : essai de l'heure 1.

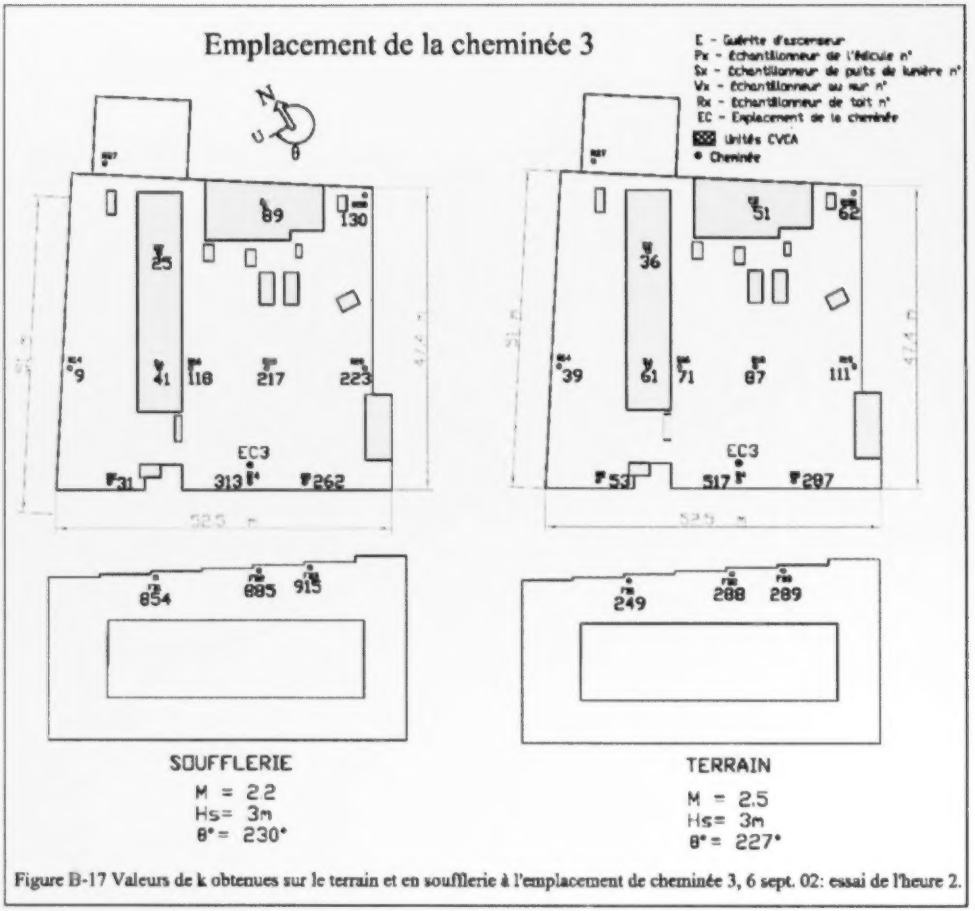


Figure B-17 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 3, 6 sept. 02: essai de l'heure 2.

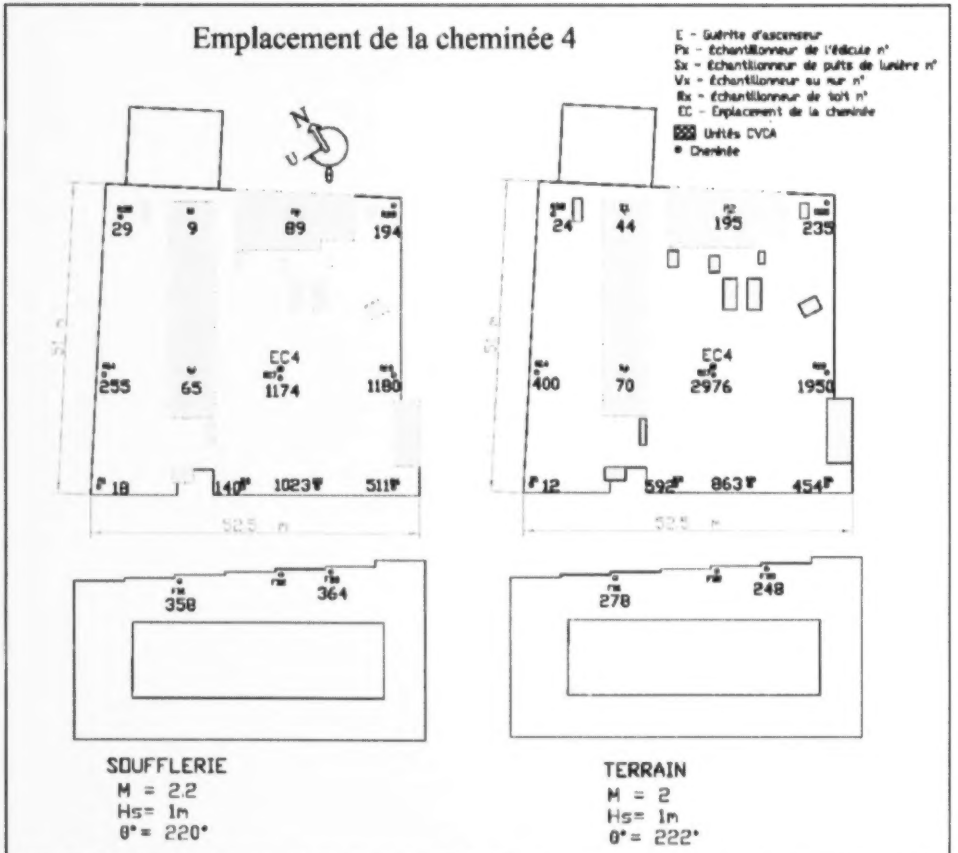


Figure B-18 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 4, 1 oct. 02 : essai de l'heure 1.

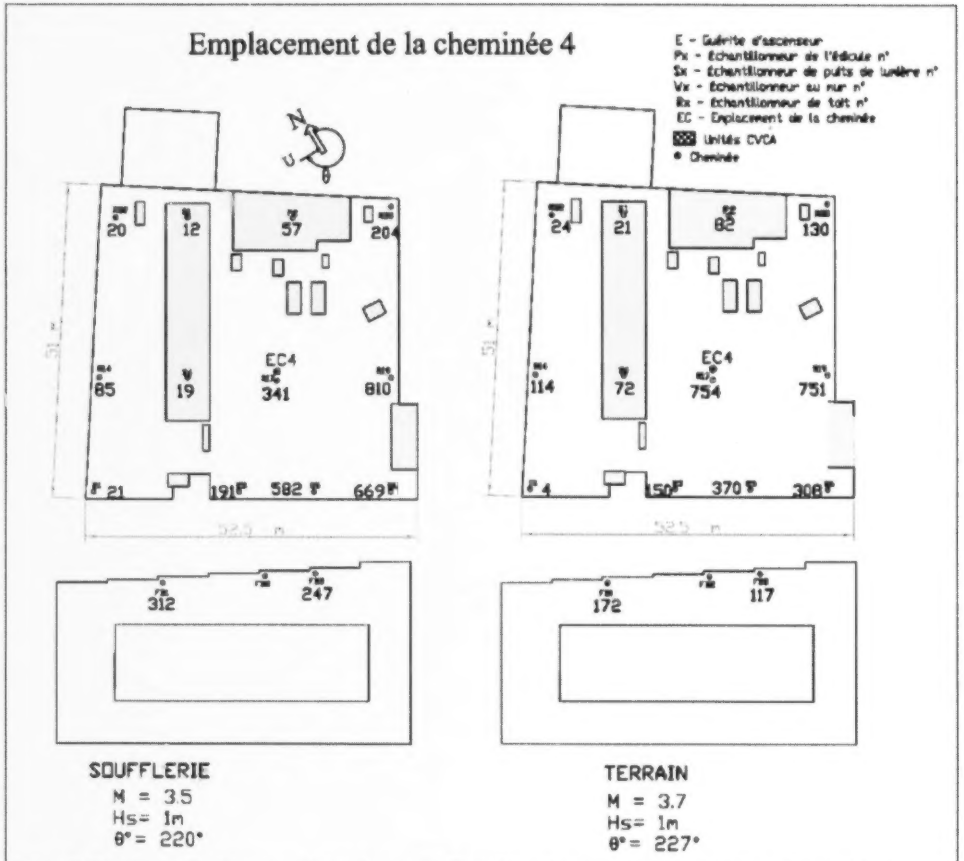


Figure B-19 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 4, 1 oct. 02 : essai de l'heure 2.

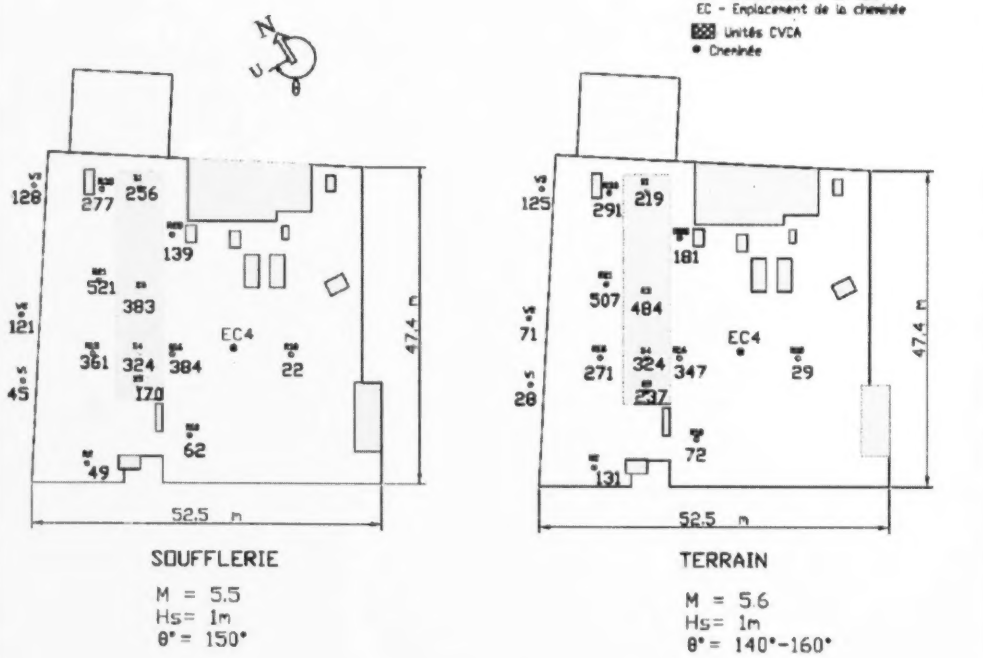


Figure B-20 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 4, 21 nov. 02 : essai de l'heure 1

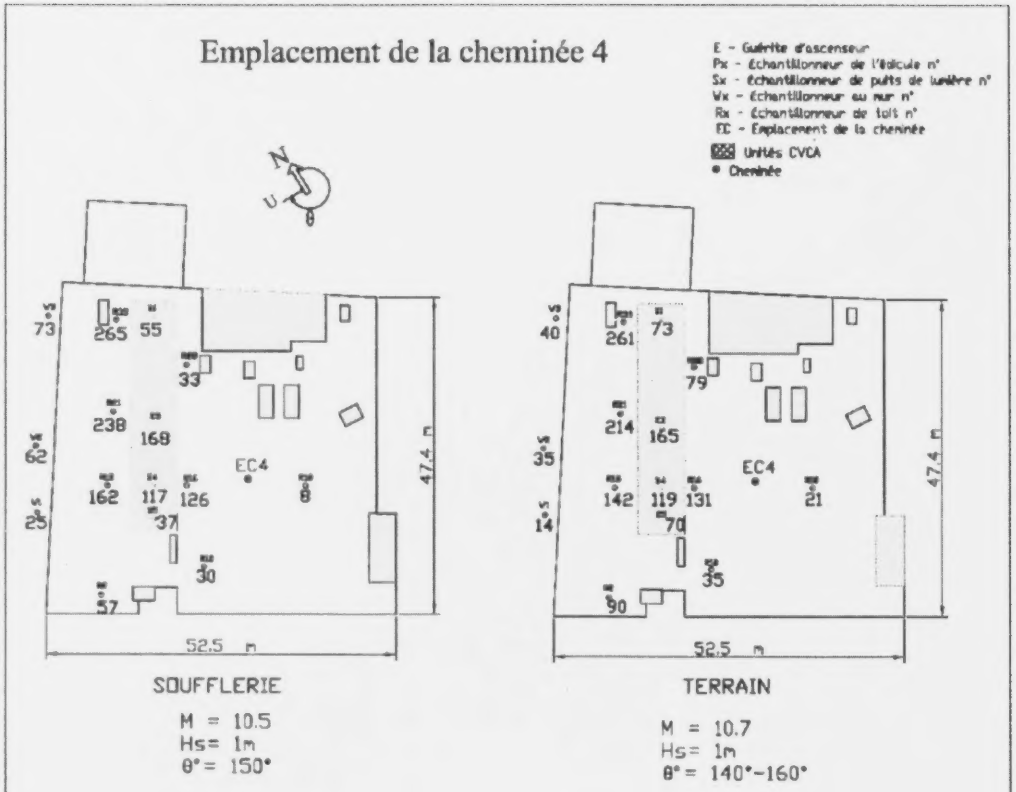


Figure B-21 Valeurs de k obtenues sur le terrain et en soufflerie à l'emplacement de cheminée 4, 21 nov. 02 : essai de l'heure 2

ANNEXE C

INSTRUMENTATION

Anémomètres

1. Un anémomètre ultrasonique de marque Gill a été utilisé pour la mesure des données éoliennes lors des essais in situ pour les emplacements de cheminée 1 et 2. Les données ont été enregistrées à une fréquence de 4 Hz avec un temps de moyennage de 1 minute.

Les paramètres éoliens suivants ont été mesurés:

Les trois composantes de la vitesse moyenne du vent, u, v, w (m/s)
Les trois composantes de l'écart-type de la vitesse, σ_{ux}, σ_{uy}, σ_{uz} (m/s)
Les trois composantes de la direction du vent, $\sigma_{\theta x}$, $\sigma_{\theta y}$, $\sigma_{\theta z}$ (degrés)
La valeur crête de rafale (m/s)

2. Un anémomètre à hélice de marque Young a été utilisé pour la mesure des données éoliennes lors des essais in situ pour les emplacements de cheminée 3 et 4 (à l'exception du test du 21.11.2002). Les données ont été enregistrées à une fréquence de 4 Hz à l'aide d'un enregistreur de données de marque Campbell Scientific CR10(X); le temps de moyennage étant de 5 minutes. Les paramètres éoliens suivants ont été mesurés:

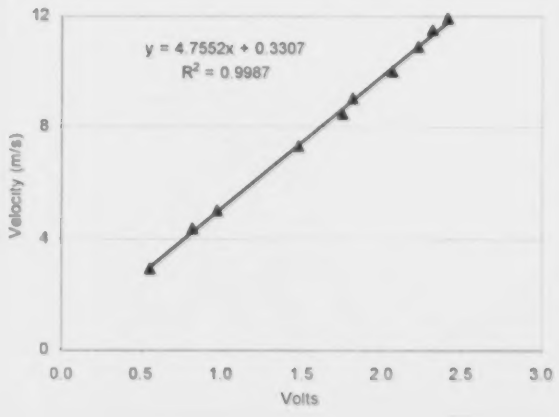
La vitesse moyenne (m/s)
L'écart-type de la vitesse moyenne (m/s)
La direction du vent (degrés)
L'écart-type de la direction du vent (degrés)

3. Pour l'essai du 21.11.2002 (emplacement de cheminée 4), un anémomètre de marque Texas Electronics a été utilisé pour la mesure de la vitesse du vent. Les données ont été enregistrées à l'aide d'un analyseur de marque Analogic Data (modèle 6100B).

Paramètres mesurés:
Vitesse moyenne (v)

$y = 4.7552x + 0.3307$
$R^2 = 0.9987$

x – Voltage en volts
y – Vitesse (velocity) en m/s

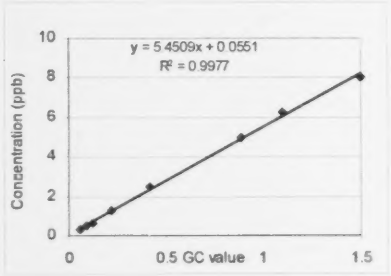


Calibration du chromatographe de marque Varian

Un chromatographe en phase gazeuse (GC) de marque VARIAN (Modèle 3400) situé dans le laboratoire d'aérodynamique du bâtiment de l'université Université a été utlisé pour la détermination des concentrations de SF_6 de près de la moitié des échantillons recueillis lors des essais in situ et pour l'ensemble des échantillons des essais en soufflerie.

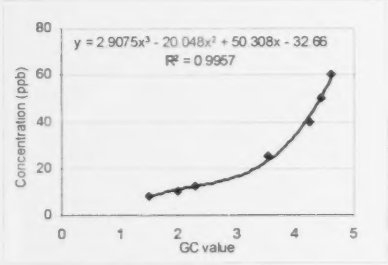
Pour les valeurs de GC entre 0 et 1.5

$y = 5.4509x + 0.0551$
$R^2 = 0.9977$



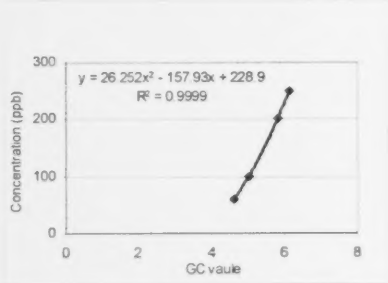
Pour les valeurs de GC entre 1.5 et 4.6

$y = 2.9075x^3 - 20.048x^2 + 50.308x - 32.66$
$R^2 = 0.9957$



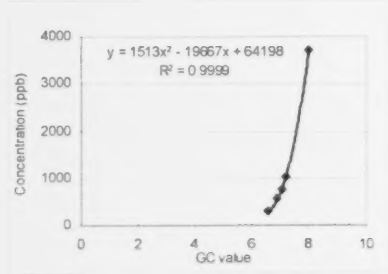
Pour les valeurs de GC entre 4.6 et 6.0

$y = 26.252x^2 - 157.93x + 228.9$
$R^2 = 0.9999$



Pour les valeurs de GC entre 6.0 et 8.0

$y = 1513x^2 - 19667x + 64198$
$R^2 = 0.9999$



y - Concentration en ppb
x – valeurs du chromatographe (GC Value)

Calibration du chromatographe Autotrac

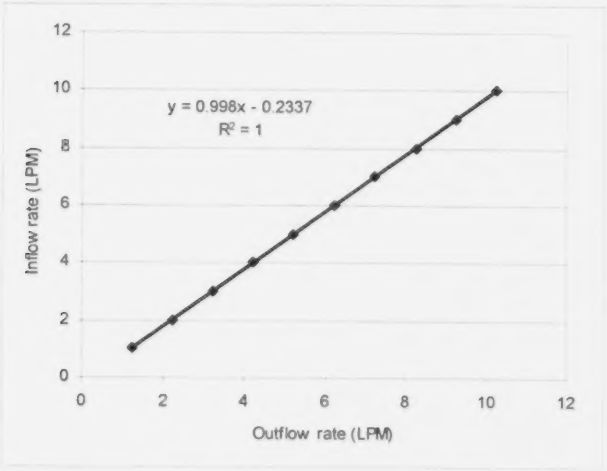
Companie: Lagus Applied Technology (LAT)
Modèle: Autotrac

Un chromatographe en phase gazeuse de marque LAT (modèle Autotrac) situé dans le laboratoire de ventilation de l'IRSST a été utilisé pour la détermination des concentrations de SF_6 pour la moitié des échantillons prélevés lors des essais in situ. La plage de linéarité dynamique de l'appareil s'étend de 0,2 ppb à 40 ppb avec une précision mesurée de ± 3%. L'appareil dispose d'un système de calibration intégré avec une source interne de gaz de calibration qui permet des vérifications périodiques de la réponse de l'instrument.

Débitmètre massique (Université Concordia)

Compagnie: Matheson

Modèle: 8270
Plage: 0-10 Lpm

$y = 0{,}998x - 0{,}2337$
$R^2 = 1$

y – débit corrigé à l'entrée (inflow)en Lpm
x – débit à la sortie (outflow) en Lpm